Universität Stuttgart
Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. P. Göhner

15.04.2011

Diplomarbeit

Mireille Laure Tchuisseu 3090 DA

Entwicklung eines Systems zur elektrischen Energieanalyse eines Waschtrockners

Betreuer: **Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner**
Prof. Dr.-Ing. Martin Radetzki
Dipl.-Ing. Andreas Beck

Diese Arbeit widme ich:

meiner lieben Mutter Émilienne, die mich in ihrer Warmherzigkeit und Liebe großgezogen hat, mich in jeder Hinsicht immer unterstützt hat und ohne die ich nicht wäre, wo ich jetzt bin

meinem geliebten Ehemann Stéphane, der mich immer mit Liebe, Geduld und Unterstützung jeglicher Art während der schweren Zeit meines Studiums begleitet hat

meiner wunderbaren Töchter Joyce-Latoya, Jodie-Latisha und Emma-Joann, die durch deren zauberhaftes Lächeln, Fröhlichkeit und Liebe mir immer Mut gegeben haben, weiter zu machen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

DA	**D**iplom**a**rbeit
GUI	**G**raphical **U**ser **I**nterface
IAS	**I**nstitut für **A**utomatisierungs- und **S**oftwaretechnik
SA	**S**tudien**a**rbeit
WSA	**W**ahl**s**tudien**a**rbeit

Begriffsverzeichnis

Aktor:	Eine Einheit zur Umsetzung von Stellinformation tragenden Signalen geringer Leistung in leistungsbehaftete Signale einer zur Prozessbeeinflussung notwendigen Energieform. [WaBe10]
Algorithmus:	Eine präzise, endliche Beschreibung eines allgemeinen Lösungsverfahrens unter Verwendung ausführbarer, elementarer Verarbeitungsschritte. [Kühn05]
Analyse:	Systematische Untersuchung eines Sachverhaltes, bei der das untersuchte Objekt untergliedert wird. Die Bestandteile werden anschließend geordnet, untersucht und ausgewertet.
Anforderung:	Teil einer Anforderungsspezifikation. Die ist eine Aussage über die Fähigkeit, die ein System besitzen muss, um diese Spezifikation zu erfüllen.
Aufwand:	Der Aufwand ist allgemein der Einsatz oder die zu erbringende Leistung, um ein Ziel zu erreichen oder einen Plan zu realisieren.
Bedieneingriff:	Ein Eingriff von außen (durch einen Benutzer) in ein System durch Veränderung von Parametern. [PfBe11]
Benutzungsoberfläche:	Eine Software-Komponente in einem System, die der Interaktion zwischen Mensch und Maschine über graphische Symbole dient.
Bottich:	Großes, offenes Gefäß, das meistens aus Holz, Metall oder Beton gefertigt ist. [Wiki11]
Energiefluss:	Bezeichnet den Transport von Energie zwischen verschiedenen Anlagen oder Systemen.
Energieverbrauch:	Energiemenge, die genutzt wird. Allerdings kann die Energie im physikalischen Sinne nicht verbraucht werden. Sie wird lediglich in andere Energieformen umgesetzt, bleibt allerdings im Gesamtsystem erhalten.
Evaluierung:	Ein Prozess, wodurch die Beschreibung, Analyse und Bewertung von Projekten gemacht werden.

IAS-WebBoard: Mikrocontroller Board, das am Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik entwickelt wurde. Es handelt sich um eine Platine, die mit einem Controller der Familie M16C der Firme Renesas und mit einem Ethernet-IC für die Datenübertragung via Ethernet ausgestattet ist. Es besteht die Möglichkeit für eine CAN-Erweiterung.

Konzept: Stellt einen Plan für ein Vorhaben dar. Es beschreibt die Handlungsschritten, die zum Erreichen eines Zieles notwendig sind.

Maßnahme: Eine Handlung, die man ausführt, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen.

Modell: Ein Entwurf oder eine Nachbildung eines Systems oder Prozesses, mit deren Hilfe eine Untersuchung oder Erforschung erleichtert, bzw. ermöglicht wird. [Dude07]

Nebenbedingung: Eine Nebenbedingung kann eine Vorgabe beschreiben, die sich beispielsweise aus dem physikalischen Zusammenhang ergibt, oder eine zusätzliche Vorgabe, durch die erst eine eindeutige Lösung des Problems möglich wird.

Nebenbedingungen kommen bei Optimierungsproblemen vor, wo eine Zielfunktion minimiert oder maximiert werden soll. [Wiki10b]

Nutzer: Eine Person, die ein Hilfsmittel zur Erzielung eines Vorteils verwendet.

Parameter: Eine kennzeichnende Größe in technischen Prozessen., mit deren Hilfe Aussagen über Aufbau, Leistungsfähigkeit eines Systems, Modells oder Werkzeugs gewonnen werden. [Dude07]

Schnittstelle: Die Schnittstelle ist ein Teil eines Systems, was aus mehreren Ports besteht und dient der Kommunikation zwischen Komponenten.

Sensor: Schnittstelle zwischen einem Automatisierungscomputer und der Systemumgebung, über die Informationen ausgelesen werden können. [LiMa06]

Simulation:	Vorgehensweise zur Analyse eines Systems. Experimente werden an einem experimentierfähigen Modell durchgeführt, um Erkenntnisse über das Verhalten des realen Systems zu gewinnen.
Simulationsmodell:	Ein spezielles Modell, dessen Gegenstand, Inhalt und Darstellung für Zwecke der Simulation konstruiert wird.
System:	Eine abgegrenzte Anordnung von Komponenten, die miteinander in Beziehung stehen. Ein System ist durch seine definierten Grenzen zur Umwelt, die Komponenten des Systems und deren dynamische Relationen, bestimmt. [Beck11]
Szenario:	Beschreibt den ausgedachten Entwurf eines Ablaufes.
Umgebung:	Der Bereich und die physikalischen Eigenschaften um ein System.
Zustand:	Eine Gesamtheit aller Eigenschaften oder Attribute, die zur Abgrenzung und Unterscheidung des jeweils betrachteten Objekts von anderen Objekten nötig sind. [WaBe10]

Zusammenfassung

Automatisierte Systeme werden heute in vielen Bereichen des täglichen Lebens eingesetzt, aber die Hauptfrage bei den Nutzern dieser Systeme ist, wie man die Energiekosten reduzieren kann. Durch die Optimierung der Parameter der automatisierten Systeme, lassen sich deren Energiekosten senken. Am IAS wird ein Ansatz zur modellbasierten nutzerorientierten Energiekostenanalyse erforscht.

Ziel dieser Arbeit war es, auf Basis dieses Ansatzes, ein System zur elektrischen Energieanalyse eines Waschtrockners zu entwickeln und prototypisch umzusetzen.

Nach Recherche der für die Energieanalyse des Waschtrockners erforderlichen Informationen wurde in der Arbeit zunächst ein Simulationsmodell eines Waschtrockners konzipiert, mit dem die Energiekosten eines Waschtrockners berechnet werden können. Auf dieser Basis wurde das System zur elektrischen Energieanalyse konzipiert. Mittelpunkt des Systems ist ein Optimierungsalgorithmus, mit dem Energieoptimierungsvorschläge auf Basis von modellbasiertem Wissen automatisiert generiert werden können. Das Konzept wurde schließlich prototypisch in MATLAB umgesetzt.

Mit dem realisierten System ist es nun möglich eine Energieanalyse mit verschiedenen Parameterwerten durchzuführen. Durch die Optimierungsvorschläge, die generiert werden, werden dem Nutzer Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt, die bei entsprechender Kommunikationsanbindung automatisch am Waschtrockner umgesetzt werden können und somit zur Reduzierung der Energiekosten führen.

Abstract

Industrial automation systems are used today in many areas of daily life, but the main question by the users of these systems is how to reduce energy costs. By optimizing the parameters of the industrial automation systems, you can reduce their energy costs. At the IAS, an approach to the model-based and user-oriented energy cost analysis is investigated.

The aim of this work was, based on this approach, to develop and prototypically implement a system for the electrical energy analysis of a washing dryer.

After researching the informations, which are required for the energy analysis of the washing dryer, first a simulation model of a washing dryer was developed in the work, with which the energy cost of a washing dryer can be computed. On this basis, the system for the electrical energy analysis was developed. Focus of the system is an optimization algorithm with which energy optimization proposals can be automatically generated on the basis of model based knowledge. Finally the concept was implemented as a prototype in MATLAB.

With the realized system, it is now possible to perform an energy analysis with different parameter values. By the optimization proposals which are generated, the user will be shown optimization options that can be automatically implemented with appropriate communications interface at the washing dryer, and hence to reduce the energy costs.

1 Einleitung

Heutzutage werden immer mehr Funktionen und „Features“ in den Geräten umgesetzt, um den Menschen zu unterstützen. Was allerdings oft vernachlässigt wird, ist die Steigerung der Energiekosten durch die zusätzlich integrierten Funktionen. Somit besteht erhöhter Bedarf an intelligenten Einrichtungen, die helfen die Energiekosten der Systeme zu optimieren. Die Basis solcher Einrichtungen bildet eine Energieanalyse, in der die Struktur, die Abläufe und die Systemumgebung analysiert und Vorschläge für Optimierungsmaßnahmen erarbeitet werden. Es werden in einzelnen Geräten und Produkten zwar z. B. Standby-Funktionen integriert, Systeme für eine intelligente Analyse der Energiekosten der Gesamtgeräte und der Geräte in Kombination unter Berücksichtigung der aktuellen Betriebsbedingungen existieren bisher aber nicht.

Ziel dieser Arbeit ist die Anwendung und Evaluierung eines Energieanalysekonzepts für automatisierte Systeme an der Demonstrationsanlage „IAS-Waschtrockner“. Im Kapitel 2 werden die Grundlagen bezüglich des „IAS-Waschtrockner“ und des anzuwendenden Energieanalysekonzepts erarbeitet. Dann wird im Kapitel 3 ein Konzept für die Umsetzung des bestehenden Energieanalysekonzepts an der Demonstrationsanlage erstellt. Das am Ende im Kapitel 4 entstandene System soll die Analyse und gegebenenfalls die Optimierung für bestimmte Beispielszenarien bis auf die minimal nötige Interaktion mit dem Nutzer selbsttätig durchführen.

2 Grundlagen der modellbasierten elektrische Energieanalyse des Waschtrockners

In diesem Kapitel wird zuerst eine Systemanalyse des IAS-Waschtrockners durchgeführt, dann werden die Formeln zur Berechnung des Energieverbrauchs und der Energiebedarf von Waschtrockner vorgestellt und schließlich wird über die Ansätze, insbesonderen über den Modellbasierten Ansatz für die elektrische Energieanalyse von automatisierten Systemen eingegangen.

2.1 Systemanalyse des IAS-Waschtrockners

Die Grundlage des Projekts bildet der IAS-Waschtrockner. Es handelt sich dabei um ein Gerät vom Typ PRIVILEG DUO 6610, das eine Kombination aus Waschmaschine und Trockner in einem Gerät darstellt.

Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, ist die Wascheinheit eine Frontlader-Maschine, d.h. die Tür befindet sich auf der Stirnseite der Maschine. Im rechten oberen Teil der Maschinenfront sind zahlreiche Taster und Drehschalter angebracht. Dadurch bietet die Maschine viele Einstellmöglichkeiten für Waschprogramme, Sparprogramme, Wassermengenwahl und Schleuderdrehzahl.



Abbildung 2.1: IAS- Waschtrockner [IAS10a]

In der folgenden Tabelle sind die technischen Daten des Waschtrockners aufgelistet.

Tabelle 2.1: Technische Daten des Waschtrockners [Priv]

Fassungsvermögen Waschen	Max. 5 kg
Fassungsvermögen Trocknen	Max. 2,5 kg
Gesamtanschlusswert	2200 W
Heizung Waschen	1950 W
Heizung Trocknen	700/1400 W
Laugenpumpe	30 W
Hauptmotor: Waschen	250 W
Hauptmotor: Schleudern	250 W
Schleuderdrehzahl	Max. 1000 U/min
Spannung	220-230V/50 Hz
Absicherung	10 A
Min. Wasserdruck	50 kPa
Max. Wasserdruck	800 kPa
Energieeffizienz	C
Waschwirkung	A

2.1.1 Aufbau und Funktionsprinzip

Im einen Bottich befindet sich drehbar gelagert die eigentliche Wäschetrommel. Über einen Wasserzulauf kann die Trommel mit Wasser gefüllt werden. Dabei fliest das Wasser durch den Spülkasten, in dem sich das Waschmittel befindet. Ein Verteiler sorgt dafür, dass gemäß Waschprogramm die richtige Kammer durchspült wird. Im Bottich sorgt ein Heizstab dafür, dass das Wasser auf die gewünschte Temperatur erwärmt wird. Die Bottichentlüftung verhindert dabei, dass sich auf Grund des Einfüll- und Erhitzungsvorgangs ein Überdruck im Bottich aufbauen kann, der die Maschine beschädigen könnte. Während des Waschvorgangs wird mittels Umlaufpumpe eine kontinuierliche Durchfeuchtung und Spülung der Wäsche gewährleistet. Ist der Waschvorgang abgeschlossen sorgt die Ablaufpumpe für eine Entleerung des Bottichs, wobei ein vorgeschaltetes Flusensieb ein Verstopfen der Wasserleitung verhindern soll. Anschließend tritt die Trocknereinrichtung in Kraft, bei der durch eine spezielle Heizung erwärmte Luft über einen Ventilator in den Bottich eingeblasen wird. Über eine weitere Öffnung

kann die Luft den Bottich wieder verlassen, so dass eine Zirkulation entsteht. Die während des Überströmens der Wäsche durch die Luft aufgenommene Feuchtigkeit schlägt sich außerhalb des Bottichs an einer mit Wasser gekühlten Fläche nieder. Daher spricht man auch von einem sog. Kondensationstrockner, der über eine Kondensationseinheit verfügt. Neben den bereits angesprochenen Aktoren gibt es noch eine Reihe von Sensoren, wie Wassertemperatursensoren oder Füllstandsensoren, die für den Ablauf des Waschprogramms notwendig sind. [IAS10a]

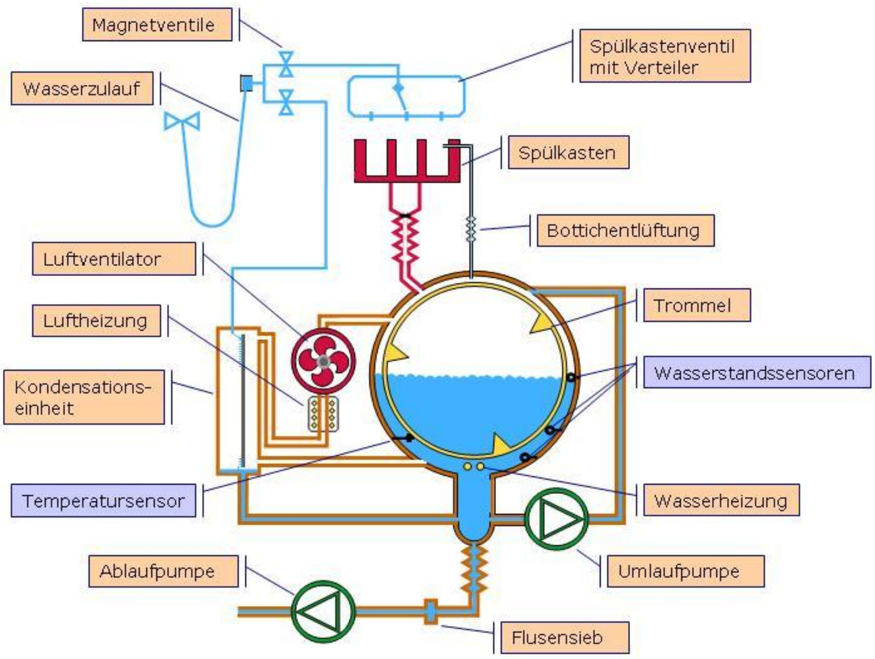


Abbildung 2.2: Prinzipieller Aufbau des Waschtrockners [IAS10a]

In der Maschine gibt es Sensoren für den Wasserstand, die Wassertemperatur, das gewählte bzw. aktuelle Waschprogramm und die Drehzahl des Trommelmotors. Die Aktoren in der Maschine sind Magnetventile, Pumpen, Motoren und Heizungen für Luft und Wasser.

2.1.2 Sensoren

Die Aufgabe von Sensoren besteht darin die meist nicht-elektrischen physikalischen Prozessgrößen zu erfassen und diese in elektrische oder optische Größen zu wandeln. Zum Beispiel in unserem Fall kommt ein Temperatursensor zur Wassertemperaturabfrage zum Einsatz. Er weist ein sogenanntes NTC-Verhalten auf, d.h., bei höherer Temperatur sinkt sein Widerstand. Das Ausgangssignal ist eine Spannung, die proportional zur Temperatur ist.

Die Funktionsweise bzw. die Identifikation von Sensoren beruhen ausschließlich auf [ScTr03]. Es wird also keine neue Untersuchungen am Waschtrockner durchgeführt. Es werden lediglich die für die Arbeit benötigten Informationen aufgeführt.

2.1.2.1 Niveauschalter

Um den Wasserstand in dem Waschtrockner zu erfassen, sind zwei Niveauschalter mit jeweils drei unabhängigen Schaltelementen vorhanden. Es handelt sich bei diesen sechs Elementen um

Umschaltkontakte, deren Schalterstellung vom Wasserstand in der Trommel abhängt. Teilweise werden die Umschalter auch nur als Ein- bzw. Ausschaltkontakt verwendet.

Die Schalter kommen nicht direkt mit Wasser in Berührung, stattdessen sind sie an einen Schlauch angeschlossen, in dem sich der Luftdruck in Abhängigkeit des Füllstandes der Maschine ändert. Damit dieser Luftdruck nicht entweicht, wenn die Türe der Maschine geöffnet wird, ist eine sogenannte „Luftfalle“ bzw. „Dom“ am unteren Ende der Waschtrommel angeschlossen. Deutlich ist dies im unteren Bild zu sehen. Über einen Schlauch wird die komprimierte Luft an die Niveauschalter, die eigentlich Luftdruckschalter sind, weitergeleitet, der Luftdruck im Schlauch kann selbst bei geöffneter Maschinentür nicht entweichen.

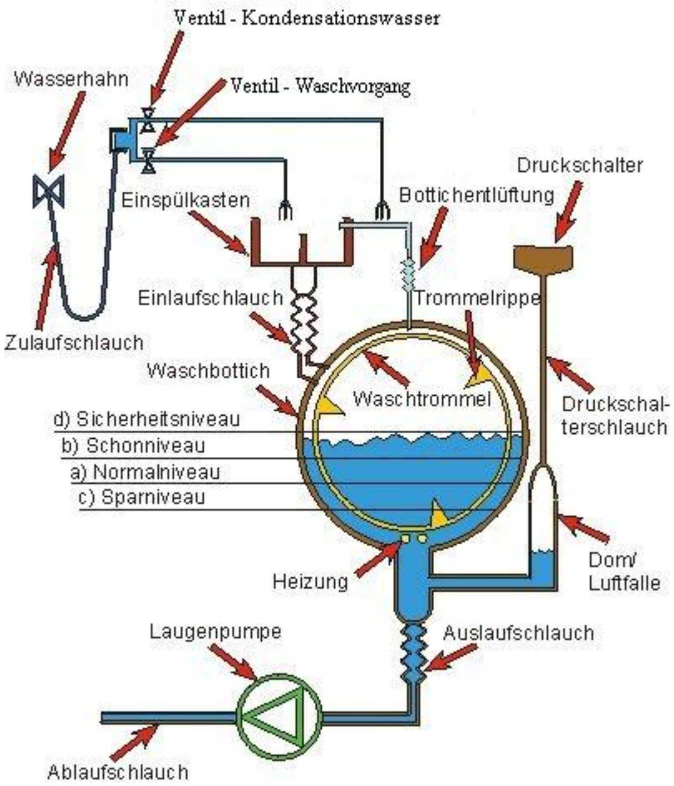


Abbildung 2.3: Wasserführung in einer Waschmaschine[IAS10a]

Die Sensoren dienen nicht nur der Steuerung des Programmablaufs, sie erfüllen auch Sicherheitsfunktionen, indem sie z.B. verhindern, dass die Wasserheizung arbeitet, ohne dass Wasser in der Trommel ist, oder dass ab einem gewissen Wasserstand die Ablaufpumpe zwangsweise eingeschaltet wird und die Maschine entleert.

2.1.2.2 Tachogenerator Trommelmotor

Dabei handelt es sich um ein frequenzanaloges Sensorelement. Direkt auf der Welle des Trommelmotors sitzt ein Generator, der bei drehendem Motor eine Wechselspannung abgibt, deren Frequenz direkt proportional zur Motordrehzahl ist. Dieser Generator besteht aus einem auf der Welle montierten Permanentmagneten und einer feststehenden Spule. Dennoch bei zu niedrigerer Geschwindigkeit, ist die Amplitude der induzierten Spannung noch gering, sie steigt

bei höherer Drehzahl bis zu einem Maximalwert von etwa 16 Volt Spitze-Spitze. Erst dann kann man die Trommelgeschwindigkeit richtig erfassen. die Amplitude bleibt konstant, lediglich die Frequenz ändert sich weiterhin.

2.1.2.3 Türverriegelung Schaltkontakt

Es handelt sich hier um einen einfachen elektromechanischen Kontakt, der aktiviert wird, sobald der Verriegelungsmechanismus seine Arbeitsposition erreicht hat und damit das Öffnen der Tür nicht mehr möglich ist.

Er gibt die Netzspannung (230V~) als Ausgangsspannung ab und versorgt damit alle Aktoren des Wasch-Trockners erst dann mit Spannung, wenn der Nutzer vor Ort nicht mehr die Möglichkeit hat, in die Trommel zu greifen.

2.1.2.4 Thermostate des Trockners

Die Thermostate bestehen aus drei Elementen:

- Arbeitsthermostat, welcher die Spannungsversorgung für den Heizkreis mit der schwarzen Anschlussfarbe unterbricht.
- Sicherheitsthermostat 1 an Anschluss A2, welcher die Spannungsversorgung beider Heizkreise auf Seite der Phase sowohl für den roten als auch für den schwarzen Heizkreis unterbricht.
- Sicherheitsthermostat 2 an Anschluss B1, welcher die Spannungsversorgung beider Heizkreise auf Seite des N -Leiters sowohl für den roten als auch für den schwarzen Heizkreis unterbricht.

Diese haben die Aufgabe, die Warmluftheizung bei Überschreiten einer bestimmten Lufttemperatur abzuschalten, um die Maschine und die in ihr enthaltene Wäsche zu schützen.

2.1.2.5 Kontrollschalter Trockner-Timer

Dieser Kontrollschalter signalisiert der Steuerungsplatine, dass vom Nutzer mit Hilfe des Trocknerdrehschalters ein Trockenvorgang ausgewählt wurde. Der Kontakt ist direkt mit diesem Drehschalter verbunden. Der Kontrollschalter wird geschlossen solange der vom Nutzer eingestellte Zeit und die dafür etwa zehn Minuten notwendige Abkühlzeit noch nicht abgelaufen ist. Welche Heizstufe und welche Trockenzeit gewählt wurde, kann mit diesem Kontakt nicht ermittelt werden. Der Trocknerschalter wird in der Regel von der Software automatisch gesteuert, aber kann jedoch durch den Nutzer manuell auf Null zurückgesetzt werden.

2.1.2.6 E-Taste

Ist die E-Taste betätigt, so werden die Waschprogramme in Energiesparprogramme ausgeführt. Bei zusätzlicher Einstellung der Waschtemperatur von 95 auf 60 Grad wird die Waschzeit verlängert aber das Wasser nicht so stark erhitzt, was bis zu 30% Energie spart.

2.1.2.7 Wasser Plus Schalter

Dieser Schalter befindet sich hinter der Blende der Waschmittelschublade oben links an der Maschine. In gedrückter Position, wird beim Spülen bei eingestellten normalen Waschprogrammen die Wassermenge erhöht.

2.1.2.8 Schleudern Taste

Mit diesem Schalter kann der Nutzer die maximale Schleuderdrehzahl vorgeben. Er kann wählen, ob sich die Trommel beim Schleudervorgang mit maximal 1000 U/min oder 650 U/min dreht. Dieser Schalter ist nur manuell an der Maschine beeinflussbar.

2.1.2.9 Temperaturwahlschalter (Einstellbarer Thermostat)

Mit diesem Drehknopf kann der Nutzer vorgeben, auf welche Temperatur das Waschwasser aufgeheizt werden soll. Dieses Element ist als Spannungsteiler beschaltetes Drehpotentiometer ausgeführt, das in Stufen eingestellt werden kann. Es besitzt einen Gesamtwiderstand von 10 k□, die angelegte Spannung beträgt 5 Volt. Die davon abgeteilte Spannung wird direkt vom Mikrocontroller der Steuerungsplatine ausgewertet. Die wählbaren Temperaturstufen in [°C] sind: kalt, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 95.

2.1.2.10 Temperaturfühler Waschwasser

Um feststellen zu können, welche Temperatur das Waschwasser tatsächlich aufweist, ist in der Trommel ein Sensor eingebaut, der seinen Widerstandswert in Abhängigkeit der Temperatur ändert. Er weist ein sogenanntes NTC-Verhalten auf, d.h., bei höherer Temperatur sinkt sein Widerstand. Er ist mit anderen, auf der Steuerungsplatine eingebauten Widerständen als Spannungsteiler verschaltet, so dass eine der Temperatur proportionale Spannung im Bereich zwischen 0 und 5 Volt vom Mikrocontroller ausgewertet werden kann.

2.1.2.11 Codierelemente Programmwahlschalter

Der Programmwahlschalter steht dem Nutzer zur Verfügung, um Waschprogramme auszuwählen. Ist das Waschprogramm eingestellt und der Waschtrockner in Gang gesetzt, übernimmt das Programm die Steuerung des Programmwahlschalters. Je nach Waschprogrammfortschritt wird der Programmwahlschalter gegen den Uhrzeigersinn elektronisch (von der Software) zurückgedreht. Dabei sind mehr als hundert Zswischenstellen.

2.1.3 Aktoren

Aktoren beschreiben allgemein Elemente, die eine Eingangsgröße in eine andersartige Ausgangsgröße umwandeln, um eine gewünschte Aktion oder einen Effekt hervorzurufen. Unter Aktoren werden in der Regel technische Einrichtungen verstanden. Vergleicht man mit einem Menschen, stellen sie die Muskeln dar, die zur Ausführung von Bewegungen oder zum Aufbringen von Kräften erforderlich sind.

Die Aufgabe von Aktoren ist die Umsetzung der vom Automatisierungs- Computersystem ausgegebenen Informationen in Stelleingriffe in dem technischen Prozess [LaGö99].

Beispielsweise um die Trommel zu bewegen, wird eine gewisse Kraft benötigt, und diese wird durch den Aktor „Trommelmotor“ aufgebracht.

Genauso wie bei den Sensoren oben beruhen die Funktionsweise und die Identifikation von Aktoren ausschließlich auf [ScTr03], also es wird wieder keine neue Untersuchungen am Waschtrockner durchgeführt.

2.1.3.1 Türverriegelungsmechanismus

Der hier verwendete Mechanismus ist ein Bimetallmechanismus. Beim Starten des Programms fließt bei geschlossener Türe Strom durch ein Bimetall, das sich erwärmt und den Mechanismus zum Verriegeln der Tür aktiviert. Sie lässt sich nun nicht mehr öffnen. Nach Beendigung des Waschvorgangs (Beenden des Stromflusses und Abkühlen des Bimetalls) verstreicht etwa zwei Minuten bis die Tür entriegelt wird. Erst dann kann die Tür wieder gefahrlos geöffnet werden.

Auch wenn die Maschine randvoll mit Wasser gefüllt ist, kann die Tür nach einem Stromausfall oder dem Abschalten des Geräts geöffnet werden. Ein entsprechender Warnhinweis findet sich in der Bedienungsanleitung.

2.1.3.2 Magnetventil Wasserzulauf

Der Wasserzulauf in den Waschtrockner wird elektrisch durch das An- und Abschalten des Magnetventils geregelt. Das Magnetventil wird über die Netzspannung (230V~) versorgt.

Es ist zu beachten, dass die Maschine überläuft, wenn unkontrolliert Wasser in die Maschine eingelassen wird. Aus diesem Grund ist in der Maschine ein Füllstandssensor vorhanden, der die Spannungsversorgung ab einem gewissen Wasserstand unterbricht. Diese Sicherheitsvorrichtung könnte überbrückt werden, da ein weiterer Niveauschalter bei viel zu hohem Wasserstand das Zwangsentleeren des Bottichs veranlasst. Allerdings ist eine solche Überbrückung – wenn überhaupt – nur dann sinnvoll, wenn sie nach einer Aktivierung nur eine kurze Zeit eingeschaltet ist und sich dann von selbst zurücksetzt. Somit ist gewährleistet, dass bei versehentlicher Aktivierung oder nicht erfolgtem Abschalten des Ventils wertvolles Trinkwasser nicht unnötig vergeudet wird.

2.1.3.3 Ablaufpumpe

Die Ablaufpumpe nimmt ihre Dienste wahr, entweder zum Wechsel des Wassers nach der Vorwäsche, zum Entfernen nach einem Waschgang, während eines Schleuder- oder Trockenvorgangs (Abführen des Kondensationswassers) oder zum Schutz der Maschine, wenn sich ein durch ein Defekt oder eine ungeeignete Manipulation von außen zu viel Wasser in der Trommel befindet und diese zum Überlaufen droht. Die Betriebsspannung beträgt (230V~).

Ein Betrieb der Pumpe ohne Wasser ist offensichtlich möglich, da dies im Trocknerbetrieb durchgeführt wird und es keinen Niveauschalter gibt, der dies verhindert.

2.1.3.4 Umlaufpumpe

Ihre Aufgabe ist, die Waschlauge unterhalb der Trommel anzusaugen und sie von oben wieder in die Trommel einzufüllen. Ziel dabei ist, mit sehr wenig Wasser auszukommen, indem die Wäsche nicht in der Waschlauge schwimmt, sondern durch Berieselung von oben benetzt wird. Die Betriebsspannung beträgt (230V~).

2.1.3.5 Wasserheizung

Ihre Aufgabe ist, das im Bottich befindliche Wasser aufzuheizen, damit sich der Schmutz besser in der Waschlauge auflöst. Es handelt sich um einen elektrischen Widerstand, der sich durch den Stromfluss erhitzt. Wird die Wärme nicht durch das umgebende Wasser aufgenommen, besteht die Gefahr, dass die Heizwendel durchbrennt, die Maschine beschädigt oder ein Feuer ausgelöst wird.

Die Heizung wird mit Netzspannung betrieben. Laut Datenblatt der Maschine hat die Heizung eine Leistungsaufnahme von 1.950 Watt. Der gemessene Widerstandswert liegt bei 27 Ohm, wobei die Heizwendel ein rein ohmsches Verhalten aufweist, also keine nennenswerten Kapazitäten oder Induktivitäten besitzt.

2.1.3.6 Motor für Programmdrehschalter

Der Nutzer wählt das gewünschte Waschprogramm durch Drehen des Programmdrehschalters aus. Der Motor ist mit dem Programmdrehschalter verbunden und steuert außerdem den Wassereinlass in die unterschiedlichen Waschmittelkammern des Einspülkastens über ein Hebelgestänge. Der Motor dreht sich bei Ansteuerung kontinuierlich weiter, wobei ein Mechanismus den Drehschalter stufenweise weiterschaltet. Ein Einschalten des Drehschalters aus der Stop-Position heraus ist nicht möglich, da dies mechanisch unterbunden ist.

Die Betriebsspannung des Motors beträgt (230V~).

2.1.3.7 Trommelmotor

Dieser Motor treibt über einen Riemen die Trommel an, um die Wäsche beim Waschen gleichmäßig zu durchfeuchten, den Schmutz auszuwaschen und beim Schleudern von Wasser zu befreien. Hier kommt der Universalmotor zum Einsatz. Der kann sowohl mit Gleich- als auch mit Wechselspannung betrieben werden. Für die Drehzahlsteuerung wird sowohl eine Phasenanschnittsteuerung als auch eine Feldschwächbetrieb durchgeführt.

Für die Phasenanschnittsteuerung ist auf der Steuerungsplatine ein Leistungs-Triac vorhanden. Dieser wird vom Mikrocontroller mit Hilfe eines separaten ICs angesteuert. Im Feldschwächbetrieb besitzt der Motor ein zu schwaches Drehmoment, um anlaufen zu können, deshalb kann in diesen Betriebsmodus nur dann sinnvoll gewechselt werden, wenn der Motor sich bereits dreht.

2.1.3.8 Timer-Motor Trocknersteuerung

Nachdem der Nutzer die Trocknerzeit eingegeben hat, wird der Timer-Motor in Betrieb genommen. Dieser Motor hat die Aufgabe, den Drehschalter der Trocknersteuerung im Laufe der Zeit weiterzudrehen und nach Ablauf der eingestellten Zeit wird noch circa zehn Minuten benötigt um der Trockner abzukühlen. Erst dann wird das Schaltelement zur Signalisierung der Beendigung des Trockenvorgangs eingeschaltet und das Öffnen des Trockners wird möglich. Die Betriebsspannung dieses Motors beträgt 230V AC 50Hz.

2.1.3.9 Magnetventil für Kondensationswasser

Im Trocknerbetrieb wird eine kleine Menge an Wasser benötigt, das die Wand des Kondensationsgefäßes kühlt, damit der beim Trocknen entstehende Dampf niederschlagen und kondensieren kann. Die Funktionsweise des Magnetventils ist vergleichbar mit einem einfach elektrischen Schalter (ein/aus). Die Betriebsspannung beträgt 230V AC.

2.1.3.10 Luftheizung

Um die Luft bis zur gewünschten Temperatur zu erhitzen, sind zwei Heizkreise in den Waschtrockner eingebracht. Es wird je nach vom Nutzer eingestellte Trocknerwunsch ein oder beide in Gang gesetzt. Sollte die Wäsche schonend getrocknet werden, so wird lediglich ein Heizkreis eingeschaltet, ansonsten die beiden.

Jede Heizwendel wird mit Netzspannung betrieben und weist einen Anschlusswiderstand von 70□ auf. Die gemessene Stromaufnahme je Heizwendel beträgt 3 Ampere, laut Datenblatt besitzt jede Heizwendel eine Leistung von 700 Watt, zusammen also 1400 Watt.

Um ein Überhitzen zu vermeiden, sind zwei Sicherheitsthermostate und ein Arbeitsthermostat eingebaut, siehe Kapitel 2.1.2.4

Die Spannungsversorgung beider Heizwendeln wird unterbrochen, wenn sich zu viel Wasser in der Trommel befindet.

2.1.3.11 Luftventilator

Seine Aufgabe ist, die Luft in der Maschine zirkulieren zu lassen, sowohl die heiße Luft während des Trocknungsvorgangs, als auch die kalte Luft während des Abkühlens. Er wird mit Netzspannung betrieben. Auch er wird bei zu viel Wasser in der Trommel von der Spannungsversorgung getrennt.

2.1.4 Steuerungsplatine

Die Steuerungsplatine des Waschtrockners übernimmt die komplette Regelung und Steuerung der Anlage. Sie hat die Aufgabe, die Sensoren mit Spannung zu versorgen, die Daten auszuwerten, das Waschprogramm weiterzuschalten und einzelne Aktoren anzusteuern, die nicht direkt mit dem Programmwahlschalter verbunden sind. Auf ihr befindet sich der Mikrocontroller des Systems.

2.1.5 Liste der Verbraucher

In der unten stehenden Tabelle werden die nach Messungen am Waschtrockner wichtigsten Energieverbraucher aufgelistet.

Tabelle 2.2: Wichtigsten Energieverbraucher des Waschtrockners

Ablaufpumpe	30 W, 230V AC 50Hz
Wasserheizung	Leistungsaufnahme: 1.950 W Gemessene Widerstandswert: 27 Ω
Trommelmotor	250 W
Luftheizung	Anschlusswiderstand: 70Ω / Heizwendel Stromaufnahme: 3 A / Heizwendel Leistung: 700 W / Heizwendel, zusammen 1400 W
Luftventilator	106 W, mit Netzspannung betrieben

2.1.6 Programmablauf – Betriebsmodus

Bei der Untersuchung des Waschtrockners lassen sich drei verschiedene Fälle für den Betrieb des Waschtrockners identifizieren. Bei der genaueren Betrachtung des technischen Prozesses stellt man fest, dass bei diesem Waschtrockner wesentlich mehr als nur drei Fälle vorhanden sind, weil die Maschine um einiges mehr als drei Wasch- und Trockenprogramme anbietet.

Im Rahmen der drei identifizierten Fälle werden alle möglichen Programmteile und Teilfunktionalitäten des Wasch-Trockners abgedeckt. Daher kann man andere Wasch-Programme, die man als zusätzliche Fälle aufführen würde, als Unterfälle dieser drei Hauptfälle darstellen, die sich nur in ihren Prozessparametern unterscheiden.

Es genügt daher, drei allgemeine Wasch- und Trockenprogramme zu betrachten, um alle Fälle der Maschine zu erfassen. Um eine eindeutige Basis für weitere Untersuchungen zu schaffen, werden den drei Fällen nun folgende drei Programme des Waschtrockners zugeordnet:

- Der Fall „Waschen“ wird dem Programm „Normalwäsche, 30°-95° C, Schalterstellung A, Trockenzeitvorwahl = 0“ zugeordnet.

Die Maschine muss aus und leer sein; der Wasserzulauf, Wasserablauf und Stromanschluss müssen gewährleistet sein und der Trockenzeitwahlschalter muss auf null gesetzt sein. Dann können folgende Schritte der Reihe nach getätigt werden:

– Maschine beladen, Tür schließen

- Wasch-Programm A wählen. Falls Energiesparmodus (nur ohne Vorwäsche möglich) dann Wasch-Programm B wählen
- Waschtemperatur einstellen (von 30° bis 95° C). Falls Energiesparmodus (nur ohne Vorwäsche möglich) dann Waschtemperatur auf 60° C einstellen)
- Schleuderdrehzahl wählen (650 oder 1000 U/min)
- Waschmittelkammer mit Waschpulver befüllen (Vor- und Hauptwäsche). Falls Energiesparmodus (nur ohne Vorwäsche möglich) dann Waschmittelkammer mit Waschpulver befüllen (nur Hauptwäsche), Eco-Taste wählen, um die Maschine im Sparmodus zu betreiben
- Maschine starten (Ein/Aus-Taste)
- Vorwaschgang. Falls Energiesparmodus (nur ohne Vorwäsche möglich) dann Vorwäsche entfällt)
- Hauptwaschgang
- Spülgang
- Schleudern und Abpumpen
- Nach Beendigung des Waschvorgangs Maschine ausschalten (Ein/Aus-Taste)
- Maschine entleeren

* Der Fall „Trocknen“ wird dem auf Programmteil „H“ folgenden reinen Trockenprogramm zugeordnet.

Die Maschine muss aus und leer sein; der Wasserzulauf, Wasserablauf und Stromanschluss müssen gewährleistet sein. Dann können folgende Schritte der Reihe nach getätigt werden:

- Maschine beladen, Tür schließen
- Trocken-Programm wählen (es gibt zwei Einstellpositionen, welche die gleiche Funktion haben)
- Trockenzeit über orange Zeitskala wählen (Trocknen mit voller Heizleistung). Falls man mit halber Heizleistung trocknen möchte, dann Trockenzeit über graue Zeitskala wählen (Trocknen mit halber Heizleistung)
- Maschine starten (Ein/Aus-Taste)
- Trocknen (Maschine beginnt mit dem Trockenvorgang)
- Abkühlen (Verbrennungsschutz, da Wäsche sehr heiß)
- Nach Beendigung des Trockenvorgangs Maschine ausschalten (Ein/Aus-Taste)
- Maschine entleeren

* Der Fall „Waschen und Trocknen“ wird dem Programm „Normalwäsche, 30°-95° C, Schalterstellung A, Trockenzeitvorwahl > 0“ zugeordnet.

Die Maschine muss aus und leer sein; der Wasserzulauf, Wasserablauf und Stromanschluss müssen gewährleistet sein. Dann können folgende Schritte der Reihe nach getätigt werden:

- Maschine beladen, Tür schließen
- Wasch-Programm A wählen. Falls Waschen im Energiesparmodus (nur ohne Vorwäsche möglich), dann Wasch-Programm B wählen.

- Waschtemperatur einstellen (von 30° bis 95° C). Falls Waschen im Energiesparmodus (nur ohne Vorwäsche möglich), dann Waschtemperatur auf 60° C einstellen.
- Schleuderdrehzahl wählen (650 oder 1000 U/min)
- Trockenzeit über orange Zeitskala wählen (Trocknen mit voller Heizleistung). Falls Trocknen mit halber Heizleistung, dann Trockenzeit über graue Zeitskala wählen (Trocknen mit halber Heizleistung).
- Waschmittelkammer mit Waschpulver befüllen (Vor- und Hauptwäsche). Falls Waschen im Energiesparmodus (nur ohne Vorwäsche möglich), dann Waschmittelkammer mit Waschpulver befüllen (nur Hauptwäsche), Eco-Taste wählen, um die Maschine im Sparmodus zu betreiben.
- Maschine starten (Ein/Aus-Taste)
- Vorwaschgang. Falls Waschen im Energiesparmodus (nur ohne Vorwäsche möglich), dann Vorwäsche entfällt.
- Hauptwaschgang
- Spülgang
- Schleudern und Abpumpen
- Trocknen (Maschine beginnt mit dem Trockenvorgang)
- Abkühlen (Verbrennungsschutz, da Wäsche sehr heiß)
- Nach Beendigung des Wasch- und Trockenvorgangs Maschine ausschalten (Ein/Aus-Taste)
- Maschine entleeren

2.2 Elektrische Energie

Die elektrische Energie oder elektrische Arbeit ist eine Form der Energie oder physikalischen Arbeit, die mittels der Elektrizität geleistet werden kann. In der Physik wird für die elektrische Energie das Formelzeichen E und die Einheit Wattsekunde (Ws) verwendet. Dabei ist 1 Ws = 1 J (Joule). Bei der Messung des Energieverbrauchs im Bereich der elektrischen Energietechnik ist die Angabe kWh (Kilowattstunde) üblich. 1 kWh = 3.600.000 Ws, 1 Ws ≈ $2{,}778 \cdot 10^{-7}$ kWh. [Wiki10a]

Allgemein ist diese Energie definiert als das Produkt aus Spannung U, Strom I und Zeit t

$$E = U \cdot I \cdot t$$

Im physikalischen Sinne kann Energie in einem geschlossenen System nicht verbraucht, sondern nur umgesetzt werden. Dennoch spricht man umgangssprachlich von Energieverbrauch, wenn man den Energieumsatz eines Systems innerhalb eines gestimmten Zeitraums betrachtet.

Es wird unterschieden zwischen Energiebedarf und Energieverbrauch. Bedarfswerte sind berechnete Erwartungswerte, die auf bestimmten Vorgaben beruhen. Verbrauchswerte hingegen sind tatsächliche gemessene Verbräuche. Dafür wird die Spannung und der Strom über eine gewisse Zeit gemessen und daraus die Energie ermittelt.

2.2.1 Energiebedarf

Der Energiebedarf von Waschtrocknern kann in fünf Klassen charakterisiert werden:

- Ein-Zustand-bedarf
- Waschvorgangsbedarf
- Spülvorgangsbedarf
- Schleudervorgangsbedarf
- Trocknungsvorgangsbedarf

Der Energiebedarf im Ein-Zustand des Waschtrockners, wird als Stillstandsbedarf oder Standby-Bedarf bezeichnet. Dabei werden nur Teile berücksichtigt die zur Betriebsbereitschaft oder zum Betrieb der Maschine beitragen. [PfBe10]

Der Waschvorgangsbedarf bezeichnet den gesamten Energiebedarf der Maschine während eines Waschvorgangs.

Der Spülvorgangsbedarf bezeichnet den gesamten Energiebedarf der Maschine während eines Spülvorgangs.

Der Schleudervorgangsbedarf bezeichnet den gesamten Energiebedarf der Maschine während eines Schleudervorgangs.

Der Trocknungsvorgangsbedarf bezeichnet den gesamten Energiebedarf der Maschine während eines Trocknungsvorgangs.

Die auf diese Art bestimmten spezifischen Energiebedarfswerte können allgemein dazu verwendet werden, Waschtrockner untereinander zu vergleichen und in Energiebedarfs- oder Energieeffizienzklassen einzuteilen. In dieser Arbeit dienen die Energiebedarfswerte als Grundlage der Modellbildung und zur Simulation des Modellprozesses.

2.2.2 Energieverbrauch

Um den Energieverbrauch berechnen zu können muss die effektive Leistung (Wirkleistung P) bestimmt werden und dann mit der Zeitdauer t, über die sie gemessen wurde multipliziert werden: $E = P \cdot t$

Bei Gleichgrößen, wie Gleichstrom oder Gleichspannung, ist die Leistung das Produkt aus Strom und Spannung. Bei Wechselstromleistung muss zusätzlich noch die Kurvenform und die Phasenlage von Strom und Spannung berücksichtigt werden.

Die Wirkleistung P ist der zeitlich arithmetische Mittelwert der Momentanleistung zum Zeitpunkt t: $P(t) = u(t) \cdot i(t)$. Bei sinusförmigen Verläufen gilt der mathematische Zusammenhang: $P = \frac{1}{T}\int_0^T \hat{\imath} \cdot \sin \omega t \cdot \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi)\, dt = \frac{i \cdot u \cdot \cos\varphi}{2} = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi$. [PfBe10]

Das für die Bestimmung der Wirkleistung verwendete 8kW Leistungs-Messgerät HM8115-2 der Firma Hameg „misst je einmal die Spannung mit einem Echteffektivwertwandler und den Strom mit einem Echteffektivwertwandler. Die Momentanleistung wird mit einem Analogmultiplexer

ermittelt. Die Spannung und der Strom zum Zeitpunkt t werden gemessen und multipliziert. Die Wirkleistung wird dann durch Integration der Momentanleistung über eine Periode T gebildet.“ [Hame09]

Nach Messung und Berechnung können die Werte über eine Schnittstelle ausgelesen werden und der Energieverbrauch, über die gemessene Zeit, bestimmt werden.

2.3 Energieanalyse und Energieoptimierung

Energieoptimierung ist ein äußert aktuelles Thema in der Wissenschaft, sowie in der Wirtschaft, im Hinblick auf die Verknappung fossiler Energieträger. Wir Menschen wollen nicht auf Komfort oder Produkte verzichten.

Die Energieoptimierung, also die Steigerung der Energieeffizienz und damit die Reduktion des Energieverbrauchs und der nachhaltige Umgang mit den verfügbaren Ressourcen stellt eine der zentralen Herausforderung der nächsten Jahrzehnte dar. Die Energieoptimierung allgemein befasst sich einerseits mit der optimalen Energieumwandlung der in Primärenergieträgern enthaltenen Energie in direkt nutzbare Energieformen, wie thermische, mechanische oder elektrische Energie. Andererseits spielt vor allem die effiziente Nutzung der Energie eine entscheidende Rolle. Selbst noch so effizient erzeugte Energie wird in der Anwendung heute nicht optimal genutzt, da bei der Optimierung in Engineering und Betrieb nur einzelne Bestandteile und Teilsysteme betrachtet werden. Eine Ursache dafür ist die hohe Komplexität heutiger Systeme und den dadurch bedingten Herausforderungen bezüglich deren Modellierung, Analyse und Optimierung selbst bezüglich einzelner Aspekte, wie beispielsweise der elektrischen Energie.

2.3.1 Warum Energieoptimierung

Gründe zum Energiesparen gibt es genauso viele wie es auch Ausreden dafür gibt. „Eine konsequent optimierte Anlage spart nicht nur Geld, sondern arbeitet immer auch in anderen Bereichen rationell und effizient.“ „Bei sonst gleichen Leistungen wird das sparsamere Produkt vorgezogen. Dieses Thema ist für den Betreiber einer Anlage wichtiger als für den Lieferanten. Der Kunde muss schließlich während der Lebensdauer der Anlage für die Energiekosten aufkommen. Energieeffizienz kann als wesentliches Verkaufsargument verwendet werden, einleuchtende Verbesserungen vorausgesetzt.“

2.3.2 Vorgehen bei der Energieoptimierung

Generell kann man den Energieoptimierungsprozess in drei Schritte aufteilen.

Im ersten Schritt steht die Bestandsaufnahme und Analyse des zu optimierenden Systems. Um ein System energietechnisch zu betrachten ist es hilfreich den Energieflusses zu analysieren. Durch die Betrachtung der Energieströme und Energieverbraucher können Einsparpotentiale ausfindig gemacht werden. Hierbei wird nicht nur die Umwandlung und Verteilung der Energie betrachtet sondern auch die Anlagen und Prozesse der Produktion. Während der Analyse

ergeben sich meistens schon erste unmittelbare Energieeffizienz-Potentiale, sowie weitere Möglichkeiten, deren technische und wirtschaftliche Machbarkeit erst noch weiter geprüft werden müssen. Allein durch organisatorische Maßnahmen kann oft schon Energie eingespart werden.

Im zweiten Schritt werden Energieeinsparkonzepte ausgearbeitet. Diese können Maßnahmen enthalten, die auf einzelne Bauteile eingehen, sowie Maßnahmen, die komplette Teilsysteme oder das Gesamtsystem beeinflussen. Generell lassen sich die Maßnahmen wie folgt zusammenfassen: Nicht verwendete Geräte oder unnötige Prozesse werden eliminiert, veraltete oder schlecht ausgelegte Geräte werden ersetzt und die Leistung wird an die Bedürfnisse des Prozesses oder der Nutzer angepasst. Sicherheitsmargen sollten überprüft und überdimensionierte Sicherheitsmargen sollten neu berechnet und so gering wie möglich ausgelegt werden. Ausschüsse in jeglicher Form sind zu verhindern, da sie nur unnötig Energie verbrauchen. Eine weitere Maßnahme ist die optimale Regelung der Geräte und Anpassung der Regelung an die Bedürfnisse der Nutzer oder an die Bedürfnisse des Prozesses. Des Weiteren kann Energie in Form von Wärme oder Bremsenergie in andere Formen von Energie umgewandelt werden.

Der dritte und letzte Schritt, ist die Untersuchung, Umsetzung und Evaluierung der Maßnahmen. Viele Maßnahmen führen zu großen Energieeinsparungen und amortisieren sich innerhalb von wenigen Jahren. Um die Maßnahmen zu bewerten, müssen Evaluierungsspezifikationen erarbeitet werden. Nur so kann festgestellt werden, wie effizient die verschiedenen Maßnahmen sind und welche Einsparung sie letztendlich gebracht haben. Das Einsparpotential ist zwar eine beliebte Größe, doch letztlich zählt nur, was auch wirklich eingespart wurde. [MaBe09]

2.3.3 Generierung von Energieoptimierungsvorschlägen für automatisierte Systeme

Die Energieoptimierung zielt darauf ab Maßnahmen zu identifizieren, die entweder die Energiekosten reduzieren oder den Zeitpunkt der Energiekosten zu optimieren. Der optimale Verbrauchszeitpunkt ist Ziel, wenn der Nutzer einen Versorgungsvertrag abgeschlossen hat, der zeitabhängige Energiekosten vorsieht. Daher muss ein allgemein gültiger Optimierungsansatz beide Dimensionen in Betracht ziehen. Neben Vorschlägen zur Energiekostenminimierung müssen also auch Vorschläge zur zeitlichen Lastverschiebung generiert werden. Zusätzlich müssen die Einflüsse auf die elektrischen Energiekosten von automatisierten Systemen mit einbezogen werden.

2.3.3.1 Einflüsse auf die elektrischen Energiekosten

Automatisierte Systeme erfüllen eine definierte Funktion, wie den Transport und die Bearbeitung von Werkstücken, den Ablauf chemischer Prozesse oder auch die Reinigung von Wäsche. Es existieren hierbei zwei Funktionstypen: nutzerbezogene und produktbezogene Funktionen. Eine nutzerbezogene Funktion ist die "erwartete oder erbrachte Wirkung eines Produktes, um einen Teil der Bedürfnisse eines bestimmten Nutzers zu erfüllen". Eine produktbezogene Funktion ist die "Wirkung eines Bestandteils oder zwischen den Bestandteilen

eines Produktes zum Zweck der Erfüllung der nutzerbezogenen Funktionen". Zusammen bilden die nutzerbezogenen und die produktbezogenen Funktionen die Gesamtfunktionalität des automatisierten Systems. Diese Funktionalität wird durch die Bestandteile des technischen Systems und der Automatisierungseinrichtungen erbracht, die hierbei die elektrische Energie verbrauchen. Die Funktion des automatisierten Systems verursacht also die gesamten elektrischen Energiekosten. Neben der Funktion existieren weitere Einflüsse auf die elektrischen Energiekosten, wie in der folgenden Abbildung dargestellt.

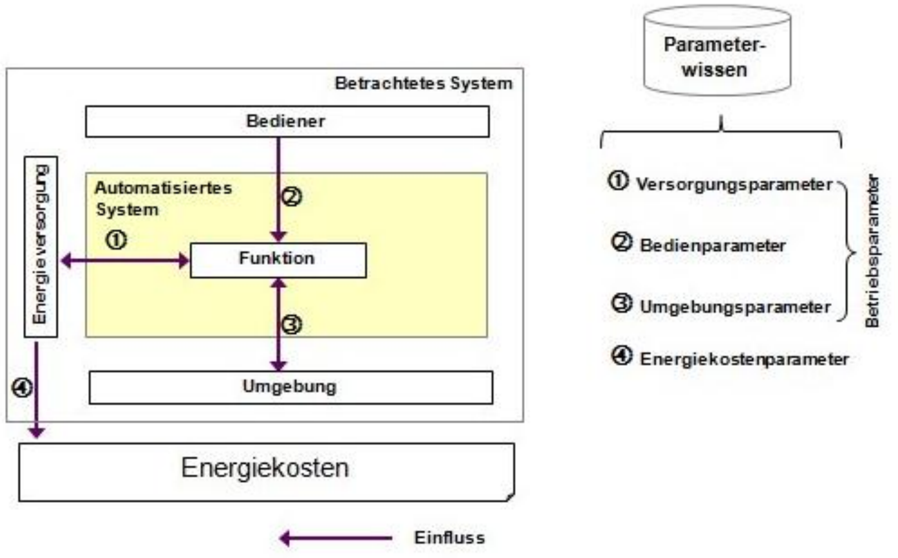


Abbildung 2.4: Einflüsse auf die elektrischen Energiekosten

Ein weiterer Einflussfaktor sind die Nutzer, die mit dem System interagieren. Mit ihren Bedieneingriffen aktivieren oder parametrieren sie die Systemfunktionen (z. B. Temperaturgrad anpassen oder einen anderen Waschprogramm auswählen). Aktivierung und Parametrierung wirken sich auf die Bestandteile aus, die die Funktion erfüllen. Daher haben diese Veränderungen der gerade ausgeführten Funktionen positiven oder negativen Einfluss auf die Energiekosten.

Schließlich muss noch die Umgebung als zusätzlicher Faktor berücksichtigt werden. Bestimmte Funktionen (z. B. Heizen und Kühlen) hängen direkt von Umgebungsparametern wie Temperatur oder Feuchtigkeit ab. In Systemen mit variablem Versorgungspegel kann auch die Wahl von Versorgungsspannung und -strom Einfluss auf die Energiekosten des Systems haben. Die Umgebung kann daher die zur Erfüllung der Funktion nötige Verbrauchsmenge erhöhen oder verringern.

Außerdem muss auch die Rückwirkung der Funktionen auf die Umgebung berücksichtigt werden. Eine Heiz- oder Kühleinrichtung beispielsweise erhöht die Umgebungstemperatur. Darum beeinflusst ein System sich selbst und andere Systeme in seiner Umgebung. [IAS10b]

2.3.3.2 Generierung von Energieoptimierungsvorschlägen

Das Problem für den Nutzer bei der Optimierung ist nun, das energieoptimale Anwendungsprofil für sein System zu finden, so dass seine Bedürfnisse und Anforderungen an das System gedeckt sind. Dabei kennt der Nutzer in der Regel seine Bedürfnisse und Anforderungen sehr genau. Die Herausforderung ist die Identifikation der optimalen Anwendung des Systems. Dies beinhaltet einerseits mögliche Optimierungsmaßnahmen zur Anpassung der Betriebsparameter, d. h. der Bedieneingriffe und der Umgebung, andererseits aber auch Anpassungen von Systemstruktur und -verhalten. Daher benötigt der Nutzer für die Optimierung derzeit ein tiefes Verständnis und Wissen über seine Systeme, um sie optimal anzuwenden und zu kombinieren.

Heutige automatisierte Systeme sind zunehmend komplex. Sie sind hoch integriert und oft physikalisch oder logisch verteilt. Um diese Komplexität zu beherrschen, werden die Systeme durch Experten entwickelt, die auf eine spezielle Domäne spezialisiert sind. Die Nutzer selbst stehen im Alltag einer Vielzahl unterschiedlicher solcher komplexer Systeme gegenüber und müssen diese Bedienen. Die zusätzliche Aufgabe der Generierung von Optimierungsvorschlägen ist für den Alltagsnutzer daher kaum machbar, wenn nicht sogar unmöglich. Deshalb benötigen die Nutzer Unterstützung bei der Identifikation von Optimierungspotential, der Generierung von Optimierungsvorschlägen und die Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen für ihre Systeme. [IAS10b]

2.3.3.3 Anforderungen an die elektrische Energieoptimierung

Eine Technik für die elektrische Energieanalyse muß mehrere Anforderungen erfüllen. Es muß möglich sein, das betrachtete System und seine Alternativen zu analysieren. Um die Alternativen zu generieren und Entscheidungen in Energieoptimierung zu treffen, muß es bekannt sein wo und warum die Energie verbraucht wird. Folglich, die elektrische Energieanalyse muß so detailliert wie möglich Information über die Energiekosten und Energieverteilung im betrachteten System ausliefern. Mit anderen Worten, die verbrauchte Energie von einzelnen Bestandteilen oder Untersysteme und die Ursachen der Energiekosten müssen bestimmt werden.

Diese Ursachen können vom System selbst, von den Bedieneingriffen oder von der Umgebung stammen. Deshalb muß die elektrische Energieanalyse all diese Ursachen aufzeichnen, erfassen und analysieren.

Die Gesamtheit von möglichen Funktionen eines automatisierten Systems geht von der eingebauten Struktur und Verhalten hervor, d. h. seine Bestandteile und ihre Interaktionen. Deshalb, um die Energiekostenaufteilung zu bestimmen, die Systemstruktur und das Verhalten müssen in einem Weg modelliert werden, der die Überwachung der Energiekosten des Systems und den einzelnen Bestandteile erlaubt.

Da die Funktion von den Bedieneingriffen und der Umgebung beeinflußt ist und die Ursachen der Energiekosten diagnostiziert sein müssen, müssen Struktur- und Verhaltensmodelle das widerspiegeln. Die Bestimmungsparameter und die gesamten Energiekosten des Systems sind

system-spezifisch und ursprünglich bekannt während des Betriebes. Um die erste Phase im Energieoptimierungsprozeß auszuführen (Bestimmung des aktuellen Energiekostensstands), muss die Analyse imstande sein entscheidende Eingabeparametern und die gesamten Energiekosten des Systems zu erfassen.

Schließlich muß es möglich sein, alternative Lösungen zu analysieren um Maßnahmen zu finden, die die Ursachen der Energiekosten beseitigen. Deshalb, Prognose der Energiekosten für hypothetische Systemstruktur und Systemverhalten, vorgeschlagene Bedieneingrifffolge oder angenommene Umgebungsparameter Entwicklung muß besorgt werden. [BeJa10]

2.3.4 Existierende Analyseansätze

Energieoptimierung ist kein neues Thema mehr, deshalb existieren auch in der Literatur viele Ansätze dazu. Diese können in vier Kategorien aufgeteilt werden: kennzahlenbasierte, wissensbasierte, ressourcenbasierte und simulationsbasierte Ansätze. In folgende Absätze werden sie kurz beschrieben.

- Kennzahlenbasierte Ansätze

Im allgemein drücken Energiekennzahlen das Verhältnis zwischen einem energetischen Wert (z. B. Energiekosten) und einem vordefinierten Leistungsindikator (z. B. Produktionsmenge) oder Umweltbedingungen (z. B. Wetter) aus. In komplexen Systemen, können Kennzahlen sowohl für das ganze System als auch für einzelne Komponente bestimmt werden. Das erlaubt das Überwachen des Einflußes und Erfolgs der Optimierungsmaßnahmen auf die kritischen Systemteile (d. h. potentielle Energieverbraucher).

- Wissensbasierte Ansätze

Der Kern von wissensbasierten Ansätzen ist eine allgemeine Wissensbasis über energetische Zusammenhängeen und Einflüsse (z. B. elektrischer Energieverlust eines Kabels wird durch Leitungswiderstand vergrößert; Leitungswiderstand wird durch Leitungslänge vergrößert und durch Leitungsquerschnitt verringert). Die Wissensbasis wird von einer Problemlösungskomponente verwendet, die das allgemeine Wissen auf ein spezifisches Problem anwendet. Energieoptimierungsmaßnahmen werden dadurch erzeugt indem, erstens die Informationen über das besondere betrachtete System (z. B. Leitungsquerschnitt) erfasst werden. Diese Informationen dienen als Eingabedaten der Problemlösungskomponente, died letztendlich mögliche Optimierungsmaßnahmen (z. B. Leitungsquerschnitt vergrößern um Verluste zu reduzieren) vorschlägt.

- Ressourcenbasierte Ansäzte

Die in der Literatur beschriebenen Methoden zerlegen das betrachtete System in Einheiten, die die Energiequellen, Energiespeicherungen und Energiekostener darstellen. Diese Einheiten werden dazu verwendet, die optimale Konstellation von Energieproduktion, Energiespeicherung und Energiekosten im Laufe der Zeit zu bestimmen. Verschiedene Ansätze berücksichtigen auch Umweltumstände durch Verwenden von Vorhersage und vorhandene Information über Netzereignisse (z. B. Versorgungsunterbrechung) oder die Umgebung (z. B. Wetter).

- Simulationsbasierte Ansäzte

Die betrachteten Systeme werden strukturell in Komponenten, ihre Schnittstellen und ihre Verbindungen zerlegt, kombiniert mit einer Beschreibung ihres inneren Verhaltens. Die Modelle erlauben entweder Experimente mit völlig virtuellen Eingangsdaten (d. h. ohne ein echtes System) oder verbunden mit einem echten System. Ein Experiment kann der Gebrauch und Optimierung von fiktiven Eingangsdaten, Prüfung von Änderungen im Verhalten von einzelnen Komponenten oder Bestimmung von Wirkungen verursacht durch Strukturänderung im System sein.

In den existierenden Ansätzen werden entweder nicht alle Zusammenhänge und Einflüsse in den betrachteten Systemen berücksichtigt oder sie erfordern ein tiefes Wissen und Verständnis des Systems. Folglich war es notwendig einen neuen Ansatz zu entwickeln, was im folgenden Kapitel beschrieben wird. [BeJa10]

2.3.5 Modellbasierte elektrische Energieanalyse von automatisierten Systemen

Der Ansatz der modellbasierten elektrischen Energieanalyse von automatisierten Systemen (E^2-Analyzer) soll den Nutzer bei der Optimierung seiner Systeme (z. B. seiner Waschmaschine) unterstützen. Wie in Abbildung 2.5 dargestellt, wird in einem ersten Schritt durch entsprechende Modellierung und Modellverknüpfung der Ist-Zustand ermittelt. In einem zweiten Schritt werden auf dieser Basis durch gezielte Veränderungen der Modelle Optimierungsvorschläge generiert, über die der Nutzer dann entscheidet. Die ausgewählten Optimierungsvorschläge werden schließlich, soweit möglich, automatisiert umgesetzt.



Abbildung 2.5: Überblick über den Ansatz

Grundlage des Ansatzes bildet ein ausführbares Modell des betrachteten Systems. Dieses Modell bildet die Systemstruktur und das Systemverhalten in Abhängigkeit der Bedieneingriffe und der Umgebungseinflüsse ab.

Das Ergebnis dieses ersten Schritts ist ein ausführbares Modell das den energetischen Ausgangszustand des betrachteten Systems repräsentiert. Das Modell erlaubt direkten Zugriff auf den Energieverbrauchsverlauf einzelner Systembestandteile und integriert alle Zusammenhänge und Einflüsse auf die elektrischen Energiekosten des betrachteten Systems. Die bleibende Herausforderung ist die Reduktion des Aufwands und der Komplexität für die Optimierung. Mit den vorgestellten Modellen müsste der Nutzer die Optimierungsvorschläge selbst identifizieren und überprüfen, um passende Optimierungsmaßnahmen zu finden. Dafür benötigt er aber Expertenwissen über das System und mögliche Anpassungen. Daher sieht der Ansatz die Integration dieses Wissens in die Modelle vor. Das Wissen definiert die Variabilität und mögliche Anpassungen. Bezüglich des Systems sind dies strukturelle Veränderungen oder Anpassungen des Systemverhaltens, wie beispielsweise der Einsatz effizienterer Bestandteile. Eine Anpassung des Nutzerverhaltens wäre z. B. die zeitliche Verschiebung der Aktivierung einer Funktion zur Vermeidung von Stand-By-Zeiten oder eine andere Reihenfolge bei der Aktivierung der Funktionen. Anpassungen der Umgebung sind eine Veränderung von Umgebungsparametern, wie Temperatur oder Energieversorgungsparameter. Die kombinierten Modelle mit integriertem Wissen werden abschließend dazu genutzt, Optimierungsvorschläge zu generieren. Diese Vorschläge basieren auf den Betriebsparameterprofilen und der vom Nutzer vorgegebenen Nebenbedingungen. Die Generierung sieht eine fortlaufende Anpassung der veränderlichen Modellparameter (d. h. Systemstruktur, Systemverhalten, Umgebungsparameter und Nutzerverhalten) mit anschließender Ausführung des Modells vor, wie in Abbildung dargestellt. Jede Anpassung resultiert in einem neuen Verbrauchsszenario. Die Resultate werden durch Vergleich mit den vorangegangenen Verbrauchsszenarien evaluiert. Dies erlaubt die automatische Identifikation und Bewertung von Optimierungsvorschlägen für das System, die Umgebung und das Nutzerverhalten. Diese automatisch generierten Vorschläge dienen dem Nutzer als Basis für seine Entscheidungsfindung. Auf Grundlage der Entscheidung des Nutzers wird schließlich das Modell an die veränderte Situation angepasst und automatisiert anwendbare Optimierungsmaßnahmen umgesetzt. [BeGö10]

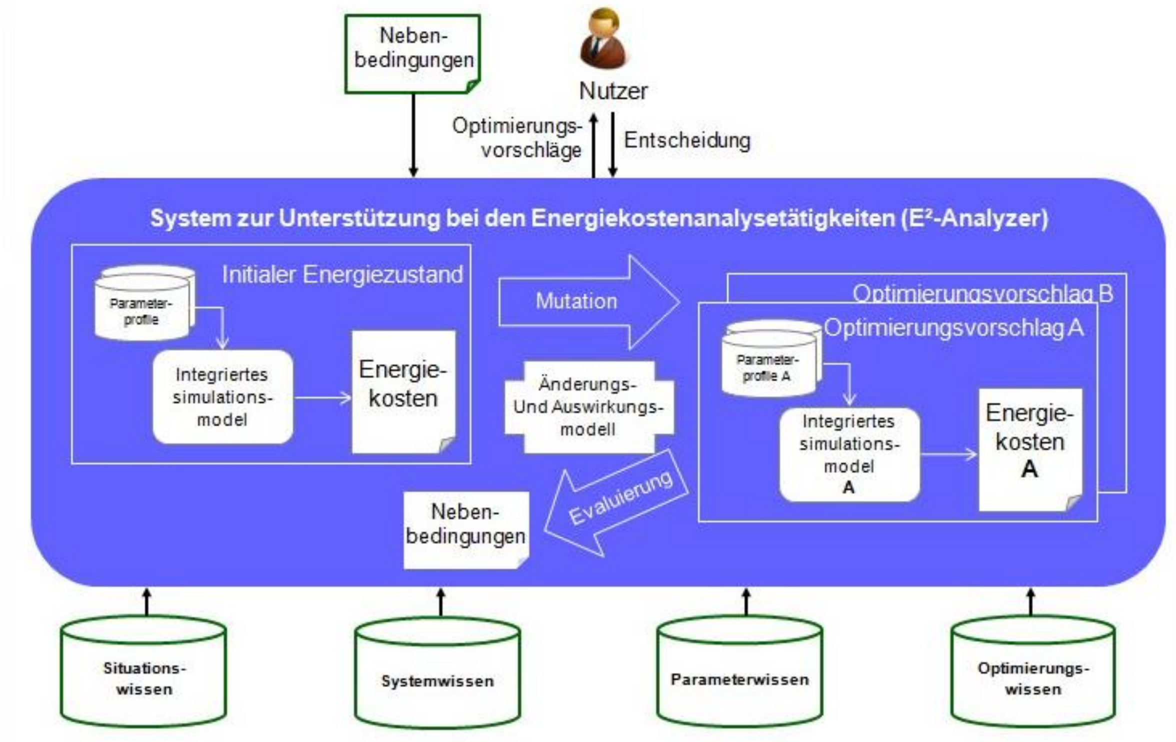


Abbildung 2.6: Generierung von Optimierungsvorschlägen

Mit Unterstützung eines Systems das den Ansatz implementiert muss der Nutzer nur noch die Nebenbedingungen vorgeben und eine Entscheidung über die umzusetzenden Optimierungsmaßnahmen treffen. Dies reduziert das erforderliche Wissen und die nötige Interaktion zur Optimierung auf ein Minimum und erhöht die Anwendbarkeit für Alltagsnutzer.

Für die Umsetzung des im Kapitel 3 konzipierten Konzepts eignet sich das Entwicklungswerkzeug MATLAB/Simulink, das im folgenden Kapitel näher vorgestellt wird.

2.4 Einführung in MATLAB/Simulink/Stateflow

Für die prototypische Umsetzung des entwickelten Konzepts zur modellbasierten elektrische Energieanalyse von automatisierten Systemen, wird das Softwarewerkzeug MATLAB/Simulink der Firma „The MathWorks“ als Entwicklungstool verwendet. Die folgenden Kapitel geben einen kurzen Überblick über die verwendeten Werkzeuge.

2.4.1 MATLAB

MATLAB ist ein kommerzielles, plattformunabhängiges Softwarewerkzeug der 1984 gegründeten Firma „The MathWorks“. Dabei bildet das numerische Berechnungstool MATLAB die Basis der Software und dient zur Lösung mathematischer Probleme. [DiBe09]

MATLAB ist eine hochentwickelte Sprache für technische Berechnungen und eine interaktive Umgebung für die Algorithmenentwicklung, die Visualisierung und Analyse von Daten sowie für numerische Berechnungen. Mit MATLAB lassen sich technische Probleme schneller lösen als mit herkömmlichen Programmiersprachen wie C, C++ und Fortran.

MATLAB (Abkürzung für „MATrix LABoratory“) wurde in den 1970er Jahren, zur Verwendung der FORTRAN-Bibliotheken LINPACK und EISPACK, an der Universität von New Mexico entwickelt. Die Bibliotheken beinhalten grundlegende Funktionen zur Berechnung von linearen Gleichungssystemen und Eigenwertberechnungen von Matrizen. Das zunächst nur an Universitäten eingesetzte Softwarewerkzeug ermöglichte eine Benutzung ohne weitere Programmierkenntnisse in FORTRAN, wurde Mitte der 1980er Jahre zu einem kommerziellen Produkt und zählt heute zu den wichtigsten Softwaretools zur Berechnung numerischer Gleichungen, nicht zuletzt dadurch, dass der Funktionsumfang von MATLAB seither ständig erweitert wird. [DiBe09]



Abbildung 2.7: MATLAB Programmübersicht [BäBe10]

Ingenieure und Wissenschaftler unterschiedlicher Anwendungsbereiche nutzen die leistungsfähige Rechen-Engine und technische Programmierumgebung mit interaktiven Analyse- und Visualisierungswerkzeugen. Unterschiedliche Anwendungsgebiete werden dabei in sogenannte „Toolboxen“ gegliedert und können je nach Bedarf der Basis Software durch Add-Ons hinzugefügt werden. Die wichtigsten Bereiche sind: [BäBe10]

- **Technische Berechnungen** – Mathematische Berechnungen, Analyse, Visualisierung und Algorithmenentwicklung.

- **Entwicklung von Steuerungen und Regelungen** – Model-Based Design von Steuer- und Regelsystemen einschließlich Simulation, Rapid Prototyping und Codeerzeugung für Embedded Systems.

- **Digitale Signalverarbeitung** – Analyse von Signalen, Algorithmen-Entwicklung und Design von DSP-Systemen.

- **Kommunikationssysteme** – Entwicklung und Simulation komplexer Kommunikationssysteme.

- **Bildverarbeitung** – Bilderfassung, Bildanalyse und –aufbereitung sowie Entwicklung von Bildverarbeitungsalgorithmen.

- **Messtechnik und Testen** – Hardwareanschlüsse und Datenanalyse für Test- und Messanwendungen.

- **Bioinformatik** – Analyse, Visualisierung und Simulation von biologischen Daten und Systemen.

- **Computational Finance** – Analyse, Simulation und Implementierung für Finanzanwendungen.

2.4.2 Simulink

Die MATLAB-Erweiterung Simulink ist eine Umgebung für die Mehrdomänensimulation und das Model-Based Design dynamischer Systeme und Embedded Systems. Es bietet eine interaktive, grafische Entwicklungsumgebung mit individuell anpassbaren Blockbibliotheken, mit denen man zahlreiche zeitvariante Systeme entwerfen, simulieren, implementieren und testen kann. Die Blockdiagramme können in einem Editor per „Drag and Drop“ in verschiedenen hierarchischen Segmentebenen aufgebaut werden und an integrierte grafische Visualisierungen angebunden werden, die eine detaillierte Analyse zulassen. In den Abbildungen 2.8 und 2.9 sind eine Programmübersicht sowie die Benutzeroberfläche von Simulink zu sehen.

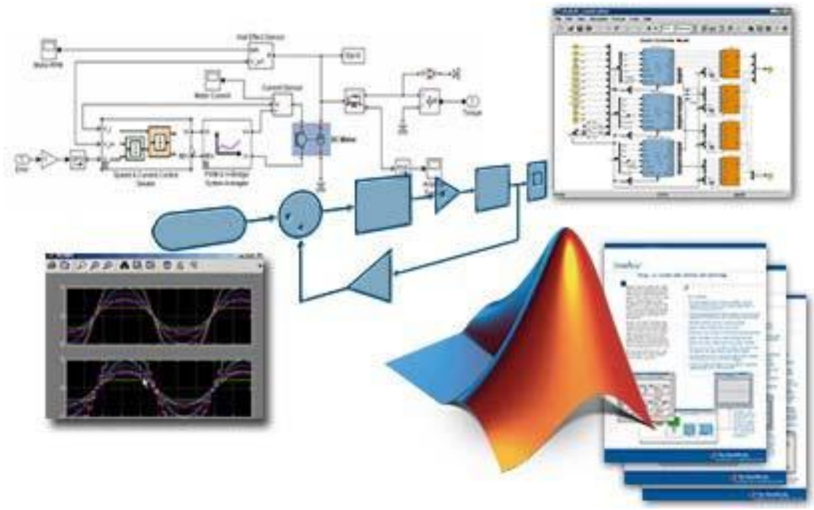


Abbildung 2.8: Simulink Programmübersicht [BäBe10]

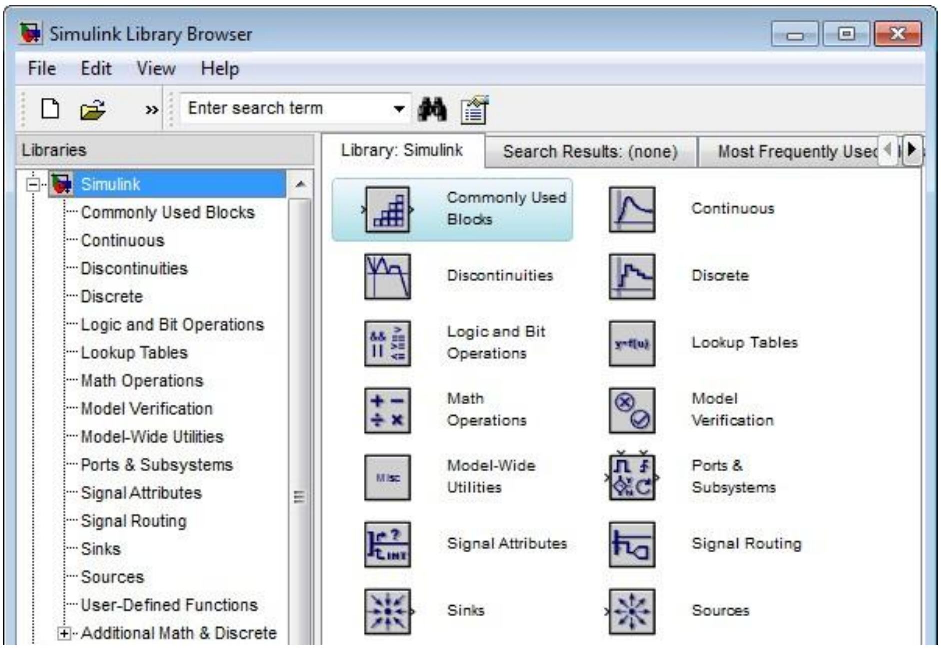


Abbildung 2.9: Benutzeroberfläche von Simulink

In Simulink können Symbole durch eine „Rechts Klick“ angepasst werden. Durch einen Doppelklick auf einzelne Komponenten öffnet sich deren Parameter Fenster, kann man sowohl die Werte als auch das zeitliche Verhalten ändern.

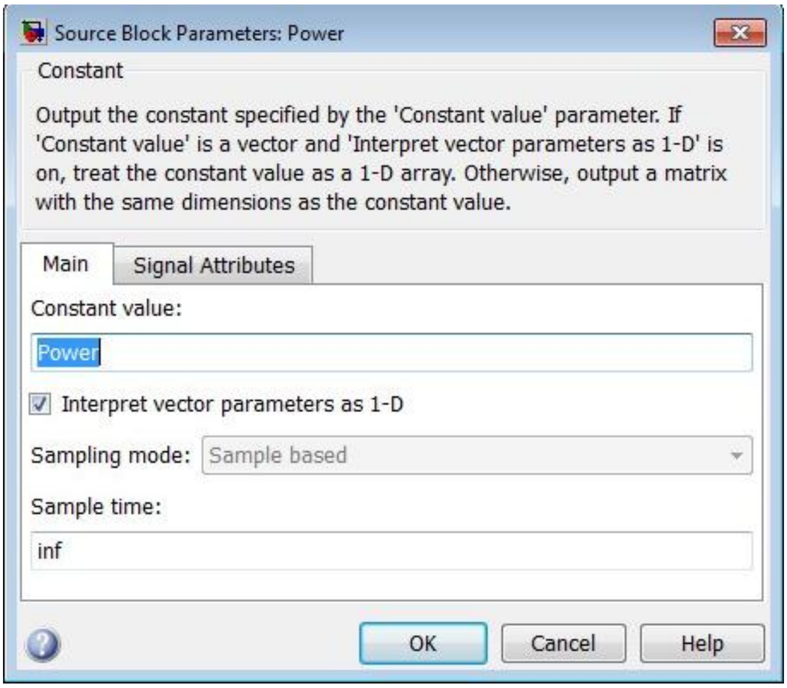


Abbildung 2.10: Eigenschaftsfenster einer Simulink-Komponente

2.4.3 Stateflow

Stateflow erweitert Simulink um eine Umgebung zur Entwicklung von Zustandsautomaten und FlowCharts. Stateflow stellt die Sprachelemente zur Verfügung, die zur Beschreibung komplexer Logik in natürlicher, leicht lesbarer und übersichtlicher Form erforderlich sind. Stateflow ist nahtlos in Simulink und MATLAB integriert und stellt eine effiziente Plattform für die Entwicklung von Embedded Systemen mit Steuerungs-, Überwachungs- und Moduslogiken dar.

Mit Stateflow-Diagrammen lassen sich Zustandssysteme mit hierarchisch und parallel angeordneten Zuständen sowie ereignisgesteuerte Übergänge zwischen diesen grafisch darstellen. Im Gegensatz zu konventionellen Zustandsdiagrammen bietet Stateflow zusätzlich Möglichkeiten zur Nutzung von Ablaufsteuerungen, Grafikfunktionen, MATLAB-Funktionen, Wahrheitstabellen, temporale Operatoren, Directed-Event-Broadcasting sowie die Unterstützung für handgeschriebenen C-Code.[Math11]

2.4.4 Der M-Code

Eine Variablendeklaration, wie in vielen anderen Programmiersprachen notwendig, ist im M-Code nicht notwendig. Die Variablenzuweisung erfolgt nach folgender Syntax:

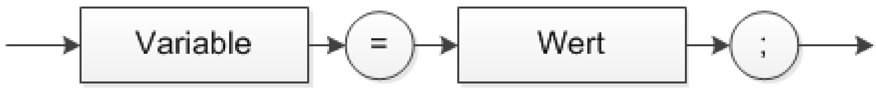


Abbildung 2.11: Variablenzuweisung in M-Code [BäBe10]

Beispiel:

```
Last = 8;
```

Funktionen werden nach dem Schema in Abbildung deklariert.

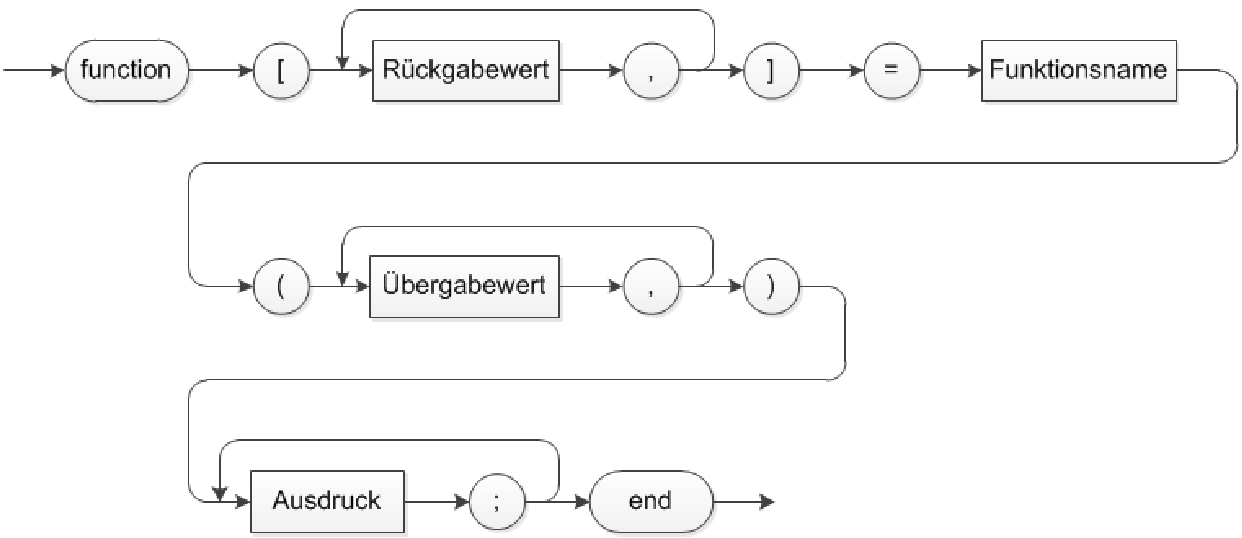


Abbildung 2.12: Funktionszuweisung in M-Code [BäBe10]

Beispiel:

```
function [sin_wert]= Sinusfkt (Zahl)
    sin_wert = sin(Zahl)*2;
end;
```

Für die Verzweigung wird das in Abbildung dargestellte Schema verwendet.

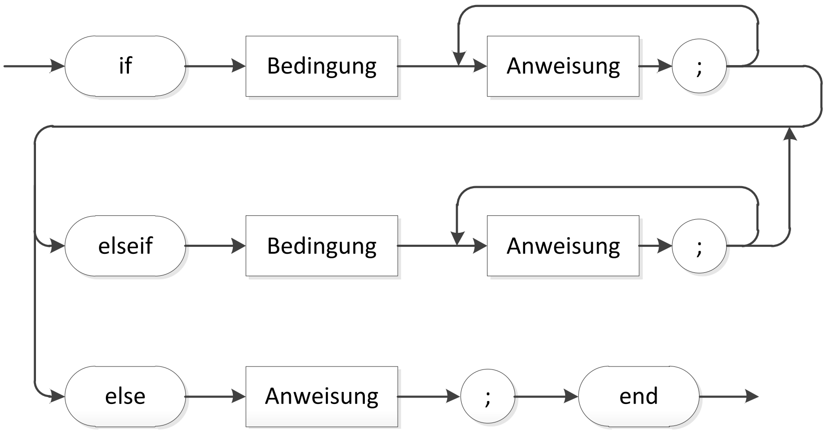
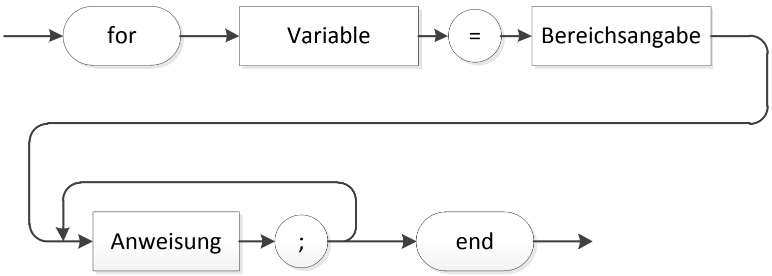


Abbildung 2.13: Verzweigung in M-Code [BäBe10]

Beispiel:

```
if Uebergabewert_1 < 10
    Rueckgabewert_1 = 15;
elseif Uebergabewert_1 < 20
    Rueckgabewert_1 = 10;
else
    Rueckgabewert_1 = 30;
end;
```

Für Schleifen werden die in den Abbildungen dargestellten Schemas verwendet.



Bereichsangabe:

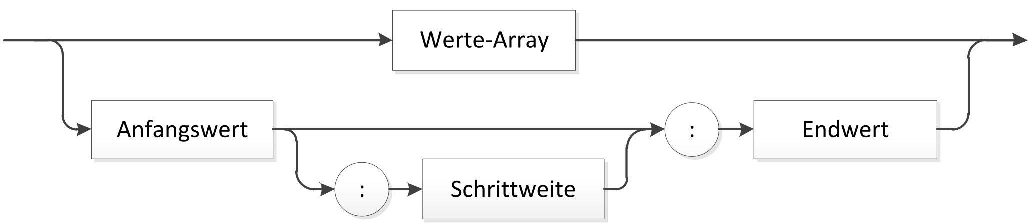


Abbildung 2.14: For-Schleife in M-Code [BäBe10]

Beispiel:

```
for i=[1,5,8,17]
    disp([‘Schleifenvariable i =’, num2str(i)]);
end

for i=1.0:-0.1:0.0
    fprintf(‘%s %d’, ‘Schleifenvariable i =’, i]);
end
```

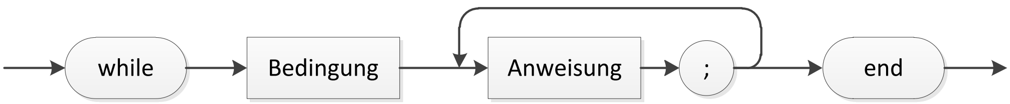


Abbildung 2.15: While-Schleife in M-Code [BäBe10]

Beispiel:

```
eps = 1;
while (1+eps) > 1
    eps = eps/2;
    disp(eps);
end
```

3 Konzeption des System zur elektrischen Energieanalyse

Für das konzipierte System zur Energieanalyse eines Waschtrockners werden in diesem Kapitel nacheinander die Architektur und ihre Komponente vorgestellt.

3.1 Systemarchitektur

In Abbildung 3.1 ist die allgemeine Struktur des zu entwickelnden Systems dargestellt.

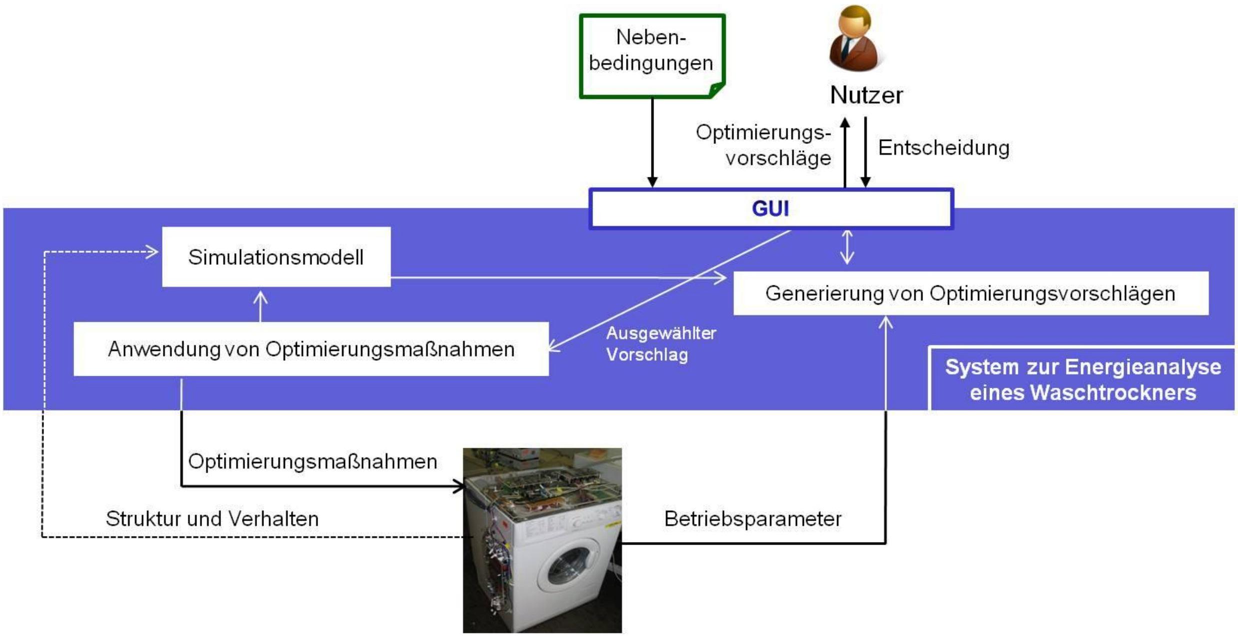


Abbildung 3.1: Struktur des Systems zur elektrischen Energieanalyse

Das System ist durch die orangene Linie begrenzt und besteht hauptsächlich aus drei Komponenten:

- Simulationsmodell
- Generierung von Optimierungsvorschlägen
- Anwendung von Optimierungsmaßnahmen

Als Eingabe für das System sind hier:

- Die Nutzereingriffe
- Die Umgebungsparameter wie Temperatur
- Die Nebenbedingungen, die vom Nutzer angegeben sind zum Zweck der Optimierung

Die Ausgabe des Systems sind die generierten Optimierungsvorschläge, die der Nutzer bekommt und dann eine Entscheidung trifft, ob die Optimierungsmaßnahme durchgeführt wird.

Für das Simulationsmodell werden nur die Bestandteile, die eine Bedeutung für die Energiekosten haben berücksichtigt. Außerdem müssen im Simulationsmodell genau wie im realen System folgende berücksichtigt werden:

- Der Einfluss der Umgebung
- Die Nutzereingriffe
- Die Energiekosten der einzelnen Komponenten des Waschtrockners

Der Block „Generierung von Optimierungsvorschlägen“ analysiert die Daten über die Energiekosten des Systems, welche er vom Simulationsmodell bekommt. Auf Grund der Ergebnisse und der vom Nutzer angegebenen Nebenbedingungen werden mögliche Veränderungen gesucht, die zu optimierten Energiekosten führen. Die Simulation wird mit diesen Änderungen nochmals durchgeführt. Der Prozess wird solange wiederholt, bis alle Möglichkeiten getestet wurden sind.

Außerdem schließt dieser Block „Wissen“ mit ein. Dies ist eine Zusammenstellung von Kenntnissen über das System, Wirkungen auf System und dessen Komponenten, und Auswirkungen der Veränderungen. Diese Kenntnisse werden bei der Generierung von Optimierungsvorschlägen benutzt.

Der Block „Anwendung von Optimierungsmaßnahmen“ bekommt die Entscheidung, die der Nutzer gemacht hat und wendet Optimierungsmaßnahmen, falls möglich automatisiert an.

3.2 Systemkomponente

3.2.1 Simulationsmodell

Der Waschtrockner kann als Zustandsautomat interpretiert werden. Nach der Definition besteht ein Zustandsautomat aus Zuständen und Zustandsübergängen. [Göhn09b]

Ein Zustand entspricht einer Zeitspanne, in der das Objekt auf ein Ereignis wartet, welches einen Zustandsübergang (auch Transition) in einen Folgezustand auslöst. Ereignisse treten zu einem bestimmten Zeitpunkt auf und haben in der Regel keine Dauer. Zur Beschreibung eines Zustandsautomaten dient das Zustandsdiagramm.

Das Zustandsdiagramm des Systems in Abbildung 3.2 zeigt die wichtigsten Zustände in denen sich der Waschtrockner befinden kann. Außerdem sind die Ereignisse die die Zustandsübergänge auslösen eingetragen.

Für einen Waschtrockner ist es möglich alle Einstellungen an der Maschine sowohl vor als auch nach dem Drücken des Hauptschalters zu machen. Hier wird die zweite Variante gewählt, da dadurch schon die Energie, die im Stand-By Modus verbraucht wird gespart werden kann.

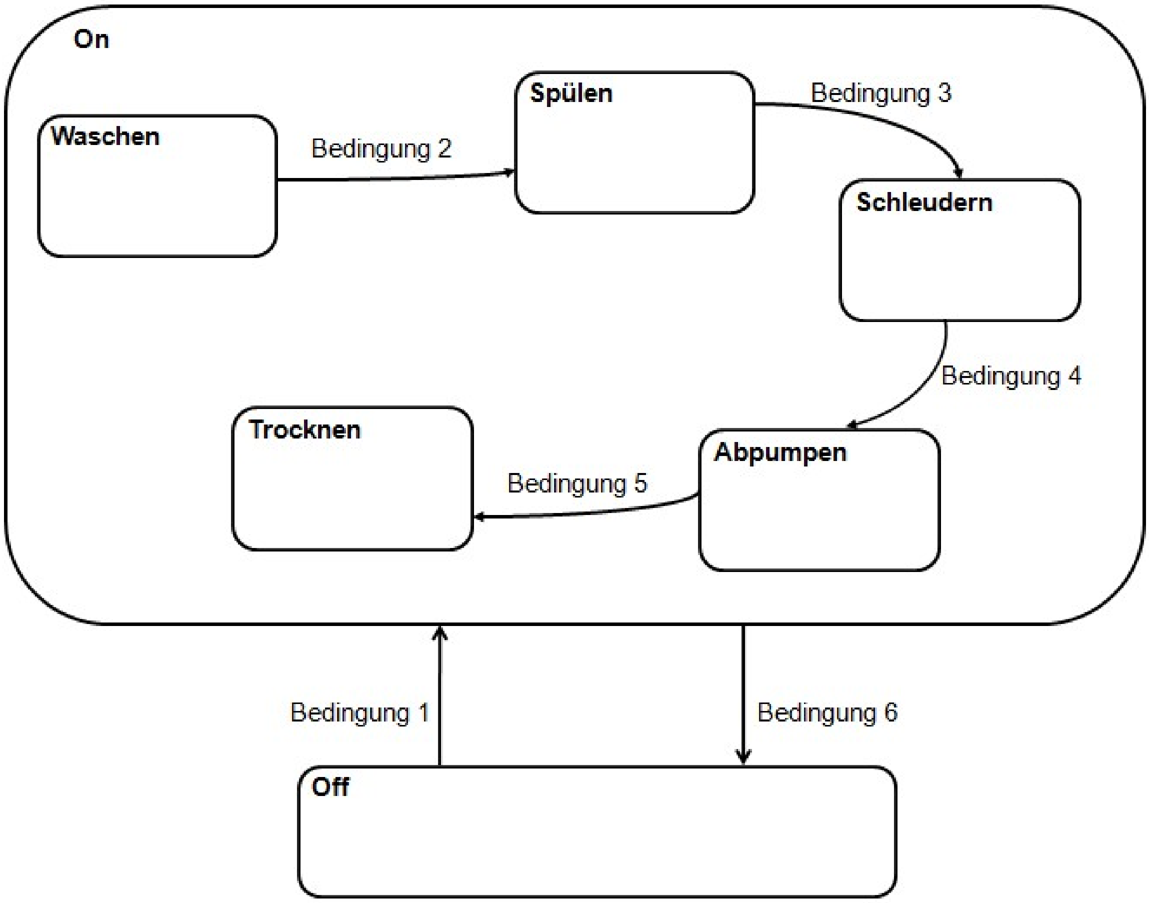


Abbildung 3.2: Zustandsdiagramm des Waschtrockners

Der Anfangszustand ist der Zustand „Waschtrockner aus“. Nachdem der Waschtrockner beladen wurde, die Tür geschlossen ist, alle Einstellungen (Wachprogramm wählen, Waschtemperatur einstellen, Schleuderdrehzahl wählen) gemacht wurden und einschließend der Hauptschalter eingeschaltet ist und den Start-Knopf gedrückt ist, geht die Maschine in den Zustand „Waschtrockner an“ über. Dieser Zustand ist wiederrum in fünf Subzuständen untergeteilt: „Waschen“, „Spülen“, „schleudern“, „Abpumpen“, „Trocknen“. Nach Ausschalten des Hauptschalters erreicht der Waschtrockner wieder der Zustand „Waschtrockner aus“. In jedem Zustand wird der Enernieverbrauch von denjenigen Verbraucher berechnet, die in diesem Zustand aktiv sind.

Benutzte Formeln für die Berechnung des Energieverbrauchs

- Wasserheizung

Die Energie der Wasserheizung ist die Heizenergie, die von der Wassermenge und von der Temperaturdifferenz zwischen Waschtemperatur und Zulauftemperatur abhängt.

Es wird die folgende Formel benutzt: $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$

c = 4,1826 J/K.g ist die Wärmekapazität vom Wasser, m die Masse des Wassers (1 Liter Wasser ~= 1 Kg) und Delta T die Temperaturänderung (Also Endtemperatur minus Anfangstemperatur).

- Motor

Die Energie des Motors ist die Schleuderenergie.
Die Stromaufnahme von dem Motor ist proportional zur Drehzahl des Motors, also $I(n) = k \cdot n$

(I = Strom, k = Proportionalitätsfaktor, n = Drehzahl)
Mit

$P = U \cdot I$ ist $P(n) = U \cdot k \cdot n$, wobei $k = Imax / nmax$ (maximaler Strom / maximale Drehzahl). Also ist $P(n) = U \cdot Imax / nmax \cdot n$ und mit $U \cdot Imax = Pmax$ haben wir $P(n) = (Pmax / nmax) \cdot n$

Die Schleuderenergie wird dann folgendermaßen berechnet:

$$E(n) = P(n) \cdot t = (Pmax / nmax) \cdot n \cdot t$$

Pmax = 250 V ist die Leistung des Motors
nmax ist die Schleuderdrehzahl, die als Eingangsparameter des Simulationsmodells angegeben ist.

- Abpumpe, Luftheizung und Luftventilator

Den Energieverbrauch dieser Komponenten wird nach der folgenden Formel berechnet:

$$E = P \cdot t$$

In der unten stehenden Tabelle wird aufgelistet, welche Verbraucher in welchen Zuständen aktiv sind.

Tabelle 3.1: Aktive Verbraucher in den unterschiedlichen Zuständen

	Wasch-trockner aus	Wasch-trockner an	Waschen	Spülen	Schleudern	Trocknen	Ab-pumpen
Ablauf-pumpe							x
Wasser-heizung			x				
Trommel-motor			x	x	x	x	
Luft-heizung						x	

Luft-venti-lator						x	

3.2.2 Generierung von Optimierungsvorschlägen

Die Realisierung erfolgt durch einen Algorithmus, der in MATLAB programmiert wird.

Nach der Simulation mit Betriebsparametern bekommt das Programm die Simulationsergebnisse (Energiekosten der Komponente) vom Simulationsmodell und kann mit der Berechnung der Optimierungsvorschläge beginnen.

Für die Optimierung ist es erstmal notwendig, alle Parameter, deren Werte variieren können und somit Einfluss auf die Energiekosten haben zu identifizieren. Hier sind die variablen Parameter:

- Die Waschtemperatur
- Die Waschzeit
- Die Zulauftemperatur

Es wird untersucht, unter welchen Bedingungen diese Parameter variieren und welche Grenzwerte sie haben.

Für die Generierung der Optimierungsvorschläge wird mit alle mögliche kombinationen dieser drei Parameter simuliert und die Ergebnisse mit dem der ersten Simulation (d. h. mit Betriebsparametern) vergliechen. Ist der Energieverbrauch des Waschtrockners aus der Simulation mit einer Kombination kleiner als der Energieverbrauch aus der Simulation mit Betriebsparametern, werden die Werte der variablen Parameter als Vorchlag für die Optimierung vorgegeben.

Der Algorithmus ist folgender:

1. Zuerst wird die Simulation des Ist-Zustands (d. h. mit den Betriebsparametern) durchgeführt. Die Ergebnisse werden gespeichert, damit man sie später mit den Ergebnissen aus anderen Simulationen vergleichen kann.

2. Dann werden anhand der vom Nutzer vorgegebenen Nebenbedingungen Parameterintervalle für die variablen Parameter berechnet um zu sehen, um wie viel man den Parameterwert erhöhen muss bis das Maximum erreicht ist.

Es gilt für jeden variablen Parameter P_i:

Intervall $\Delta P_i = \frac{(P_{i,max} - P_{i,min})}{Intervallanzahl\ Z_i}$, wobei $P_{i,max}$ und $P_{i,min}$ die Grenzwerte für den variablen Parameter P_i ist und der Intervallanzahl Z_i die Genauigkeit festlegt.

Grenzwerte der variablen Parameter:

- Die Waschtemperatur hängt vom Verschmutzungsgrad und von der Waschzeit ab

Die maximale Waschtemperatur = 95 °C (maximale Waschtemperatur des Waschtrockners)

Die minimale Waschtemperatur = f(Verschmutzungsgrad, maximale Waschzeit). Die maximale Waschzeit ist aber eine Konstante, was als Nebenbedingung angegeben ist. Somit hängt die minimale Waschtemperatur nur vom Verschmutzungsgrad ab, d. h. minimale Waschtemperatur = f(Verschmutzungsgrad). Der Verschmutzungsgrad nimmt aber nur drei mögliche Werte an, deshalb wurden in dem Algorithmus Werte für diese minimale Waschtemperatur gesetzt:

Verschmutzungsgrad = „leicht“ → minimale Waschtemperatur = 10°C

Verschmutzungsgrad = „mittel“ → minimale Waschtemperatur = 30°C

Verschmutzungsgrad = „stark“ → minimale Waschtemperatur = 60°C

- Die Waschzeit hängt vom Verschmutzungsgrad und von der Waschtemperatur ab

Die maximale Waschzeit ist eine Konstante (Nebenbedingung)

Die minimale Waschzeit = f(Verschmutzungsgrad, maximale Waschtemperatur). Die maximale Waschtemperatur ist aber eine Konstante. Somit hängt die minimale Waschzeit nur vom Verschmutzungsgrad ab, d. h. minimale Waschzeit = f(Verschmutzungsgrad). Der Verschmutzungsgrad nimmt aber nur drei mögliche Werte an, deshalb wurden in dem Algorithmus Werte für diese minimale Waschzeit gesetzt:

Verschmutzungsgrad = „leicht“ → minimale Waschzeit = 50 min

Verschmutzungsgrad = „mittel“ → minimale Waschzeit = 60 min

Verschmutzungsgrad = „stark“ → minimale Waschzeit = 70 min

- Die Zulauftemperatur ist abhängig von der Nutzersituation. Folgende Werte wurden angenommen:

maximale Zulauftemperatur = 60°C)

minimale Zulauftemperatur = 10°C

3. Es werden mehrere Intervallkombinationen durch Permutation gebildet.

- Zuerst wird für jeden variablen Parameter Pi einen Array erzeugt mit alle Werte, die diesen Parameter annehmen kann (die Werte gehen von Pi,min bis Pi,max und immer um dPi inkrementiert).
- Dann wird ein Cell-Array erzeugt, das alle möglichen Intervallkombinationen enthält. Jedes Element des Cell-Array ist eine Kombination aus jeweils einem Wert für jeden variablen Parameter Pi.

4. Die Simulation wird mit einer Kombination durchgeführt.
5. Das Ergebnis wird mit dem von der Simulation des Ist-Zustands verglichen
6. Ist der Energieverbrauch gesenkt, wird erst die aktuelle Parameterintervallkombination gespeichert für die Generierung des Optimierungsvorschlags und danach geprüft, ob alle

Kombinationen untersucht sind. Wenn ja, Übergang zum Punkt 7, wenn nein wird mit der nächsten Kombination simuliert (d.h. zurück zum Punkt 4).

Ist der Energieverbrauch nicht gesenkt, dann wird auch geprüft, ob alle Kombinationen untersucht sind. Wenn ja, Übergang zum Punkt 7, sonst zurück zum Punkt 4

7. Der Optimierungsvorschlag wird ausgegeben

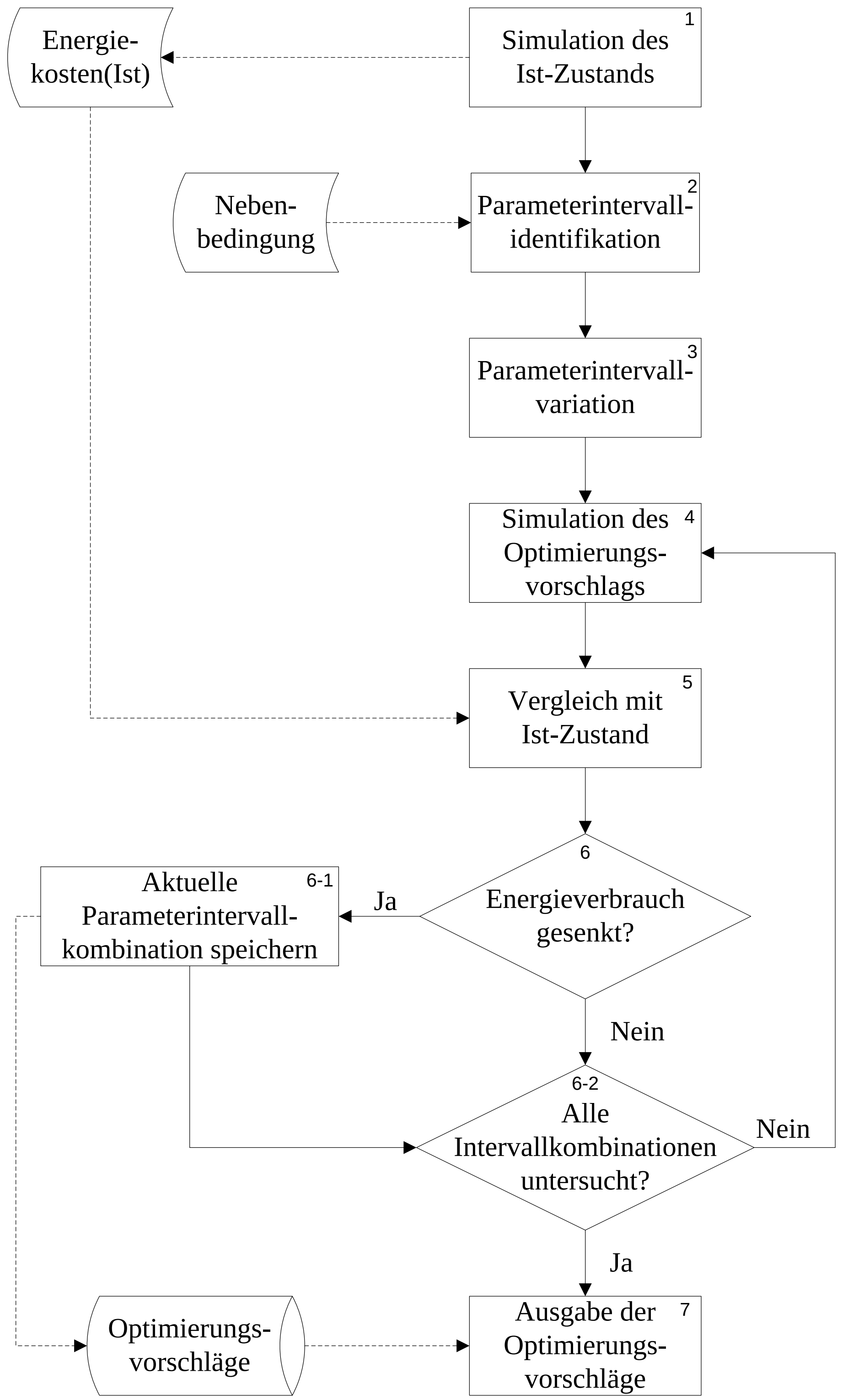


Abbildung 3.3: Ablaufplan der Generierung von Optimierungsvorschlägen

3.2.3 Anwendung von Optimierungsmaßnahmen

Wenn die Nutzerentscheidung gemacht ist, müssen die nötigen Anwendungen am realen System (z.B. Veränderungen von Konfigurationsparametern) wenn möglich durchgeführt werden.

3.3 Schnittstellenbeschreibung

3.3.1 GUI

Die grafische Benutzungsoberfläche wird mit Hilfe von MATLAB entworfen. Sie ist dafür da, um die Interaktion zwischen dem Nutzer und das System zu ermöglichen. In Abbildung ist der Entwurf des GUIs dargestellt.

Die Benutzungsoberfläche muss folgende Komponenten beinhalten:

- Drei Buttons: ein für den Start der Generierung von Optimierungsvorschlägen, eins für die Anwendung der gewählten Optimierungsmaßnahme und eins zum Schließen des GUIs.
- Ein Feld für die Eingabe der Betriebsparameter
- Ein Feld für die Eingabe der Nebenbedingungen
- Ein Feld, in dem die Optimierungsvorschläge ausgegeben werden. Die Optimierungsvorschläge werden in List-Form dargestellt. Der Nutzer muss eine Variante wählen und mit Buttondruck wird der Vorschlag zurück an das System geschickt. Dieser Vorschlag wird entweder vom Simulationsmodell oder vom realen System übernommen.



Abbildung 3.4: Entwurf der GUI

4 Prototypische Umsetzung des Systems

Wie die einzelnen Komponenten des konzipierten Systems umgesetzt wurden, wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

4.1 Struktur des Prototyps

In Abbildung 4.1 ist die allgemeine Struktur des Prototyps dargestellt.

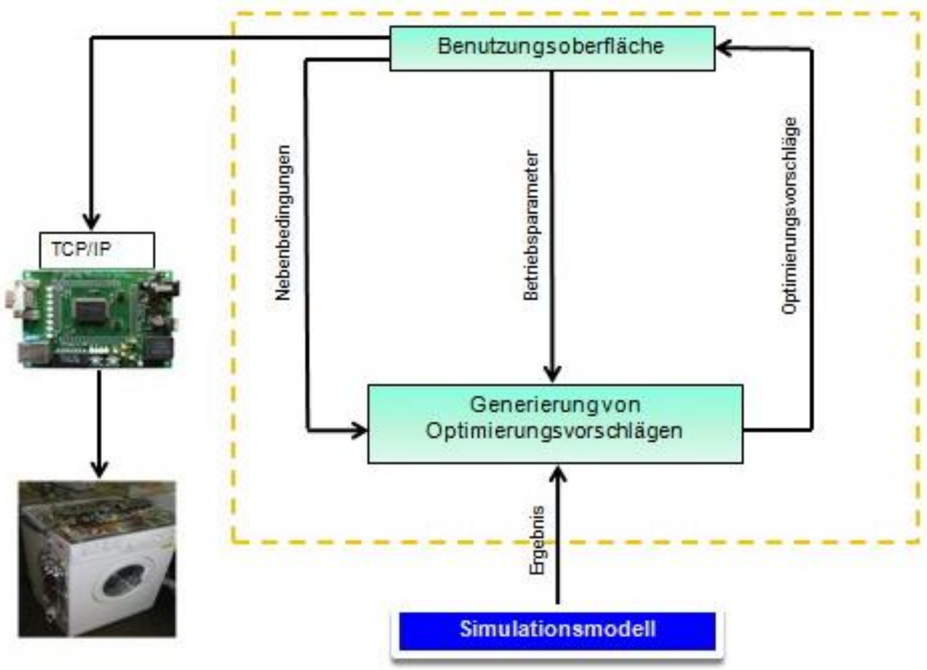


Abbildung 4.1: Struktur des Prototyps

Der Prototyp beinhaltet das System zur elektrischen Energieanalyse und das Simulationsmodell.

Das Programm besteht aus zwei Teilen:

1. Benutzungsoberfläche zur Interaktion mit dem Nutzer und zur Konfiguration des Systems.
2. Algorithmus zur Generierung von Optimierungsvorschlägen zur Sammlung und Bewertung von Optimierungsmaßnahmen.

4.2 Benutzungsoberfläche

Die Benutzungsoberfläche gibt dem Nutzer die Möglichkeit seine Nebenbedingungen vorzugeben und sich Optimierungsvorschläge anzeigen zu lassen. Zusätzlich können die Betriebsparameter konfiguriert werden auf deren Basis die Optimierung durchgeführt wird. Diese Parameter sollen bei Anbindung an die reale Waschmaschine automatisiert erfasst und ausgewertet werden.

Die Benutzungsoberfläche beinhaltet folgende Elemente:

1. Ein Panel für die Betriebsparameter, das die folgenden Elemente beinhaltet:

- Ein Drop-Down Menu zum Wählen des Waschprogramms

Hier sind zwei Waschprogramme für die Simulation wählbar: „Pflegeleicht“ und „Koch- / Buntwäsche“

- Ein Drop-Down Menu zum Wählen der Waschtemperatur

Für die zwei oben genannten Waschprogramme stehen zwei verschiedene Waschtemperaturen zur Auswahl: „40 °C“ und „60 °C“

- Ein Textfeld zur Eingabe der Zulauftemperatur

Wird eine Zahl kleiner 10 oder größer 60 eingegeben, erscheint ein Fenster mit einer Fehlermeldung.

- Ein Drop-Down Menu zum Wählen der Schleuderdrehzahl

Es gibt zwei mögliche Schleuderdrehzahlen: „650 U/min“ und „1000 U/min“

- Ein Textfeld zur Eingabe der Trockenzeit

Der Trockenzeitwahlschalter auf dem Waschtrockner geht von 0 bis 120 min. Wird eine Zahl kleiner 0 oder größer 120 eingegeben, erscheint ein Fenster mit einer Fehlermeldung.

- Ein Drop-Down Menu zum Wählen der Heizleistungsart
  Man kann entweder „halbe Heizleistung“ oder mit „volle Heizleistung“ auswählen

2. Ein Panel für die Nebenbedingungen, das die folgenden Elemente beinhaltet:

- Ein check-Box und ein dazugehöriges Drop-Down Menu zum Wählen des Verschmutzungsgrades.

Der Verschmutzungsgrad ist in drei Kategorien untergeteilt: die Wäsche ist entweder „leicht“ verschmutzt, oder „mittel“ verschmutzt oder aber „stark“ verschmutzt.

- Ein check-Box und ein dazugehöriges ein Drop-Down Menu zum Wählen des Gewichts der Wäsche.

Der Waschtrockner darf mit maximal fünf Kilogramme Wäsche beladen werden.

- Ein check-Box und ein dazugehöriges ein Textfeld zur Eingabe der vom Nutzer gewünschten maximalen Waschzeit.

Nicht alle Nebenbedingungen müssen gewählt werden. Damit eine angegebene Nebenbedingung gültig ist, muss der check-Box gecheckt werden.

3. Ein Start-Button
   Start der Analyse und der Generierung von Optimierungsvorschlägen

4. Ein Panel mit integrierter List Box für die Ausgabe der Optimierungsvorschläge. In Abbildung 4.2 ist die List Box nach der Optimierung dargestellt.

Die Struktur des Vorschlages ist:

- Nummer des Vorschlages (z. B. Vorschlag 1)
- Zu verändernder Parameter mit Wert (z. B. Parameter = Wert des Parameters)

5. Eine Schaltfläche „Opt. Vorschlag anwenden“ um der ausgewählte Vorschlag direkt am Waschtrockner anzuwenden. Die Schaltfläche wird erst nach Auswahl eines der Vorschläge aktiv.
6. Eine Schaltfläche „Close“ um die Benutzungsoberfläche zu schließen

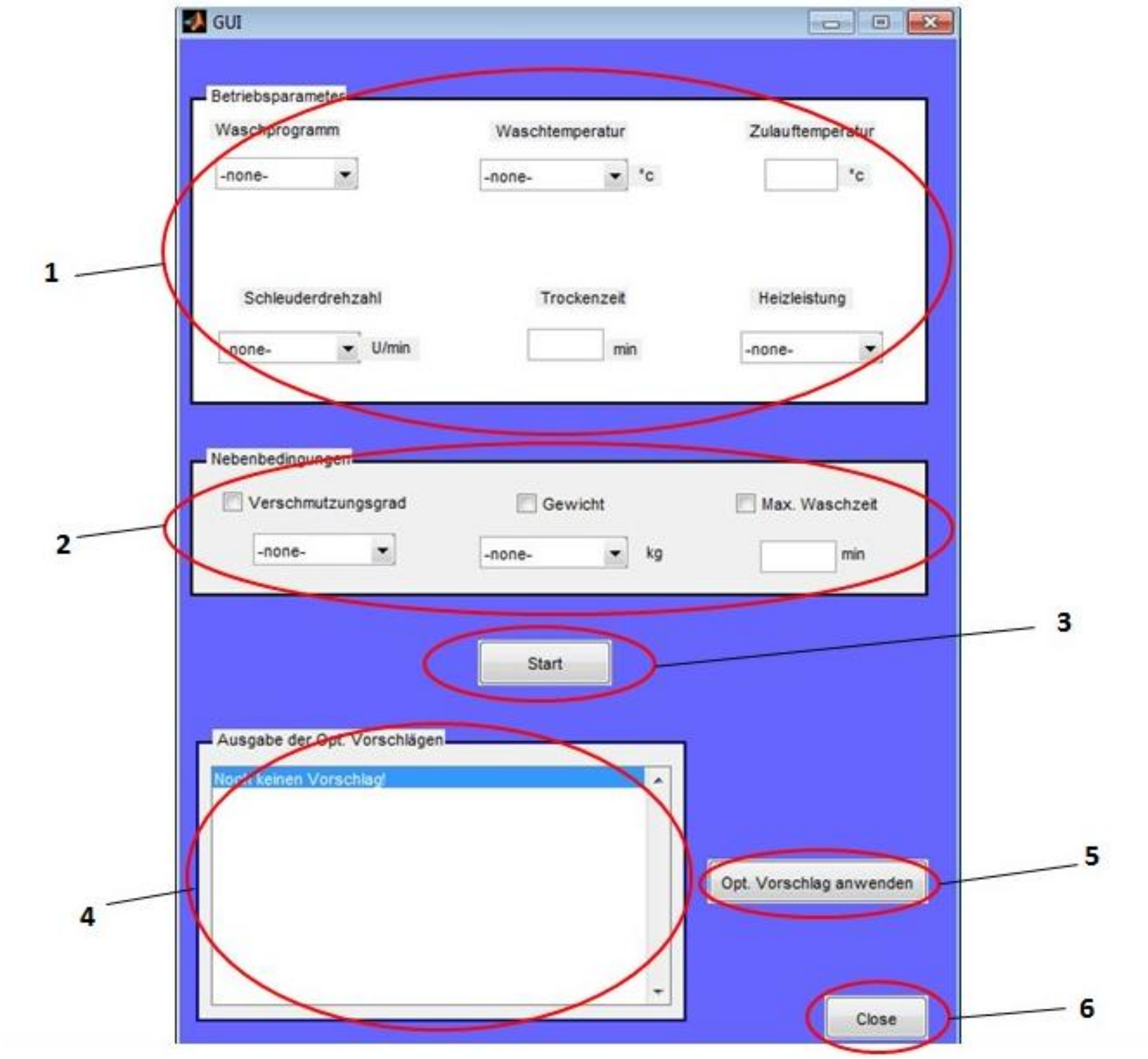


Abbildung 4.2: Benutzungsoberfläche



Abbildung 4.3: Benutzungsoberfläche: List-Box mit Optimierungsvorschlägen

4.3 Simulationsmodell

Abbildung 4.4 zeigt das Blockschaltbild des Simulationsmodells in Simulink.

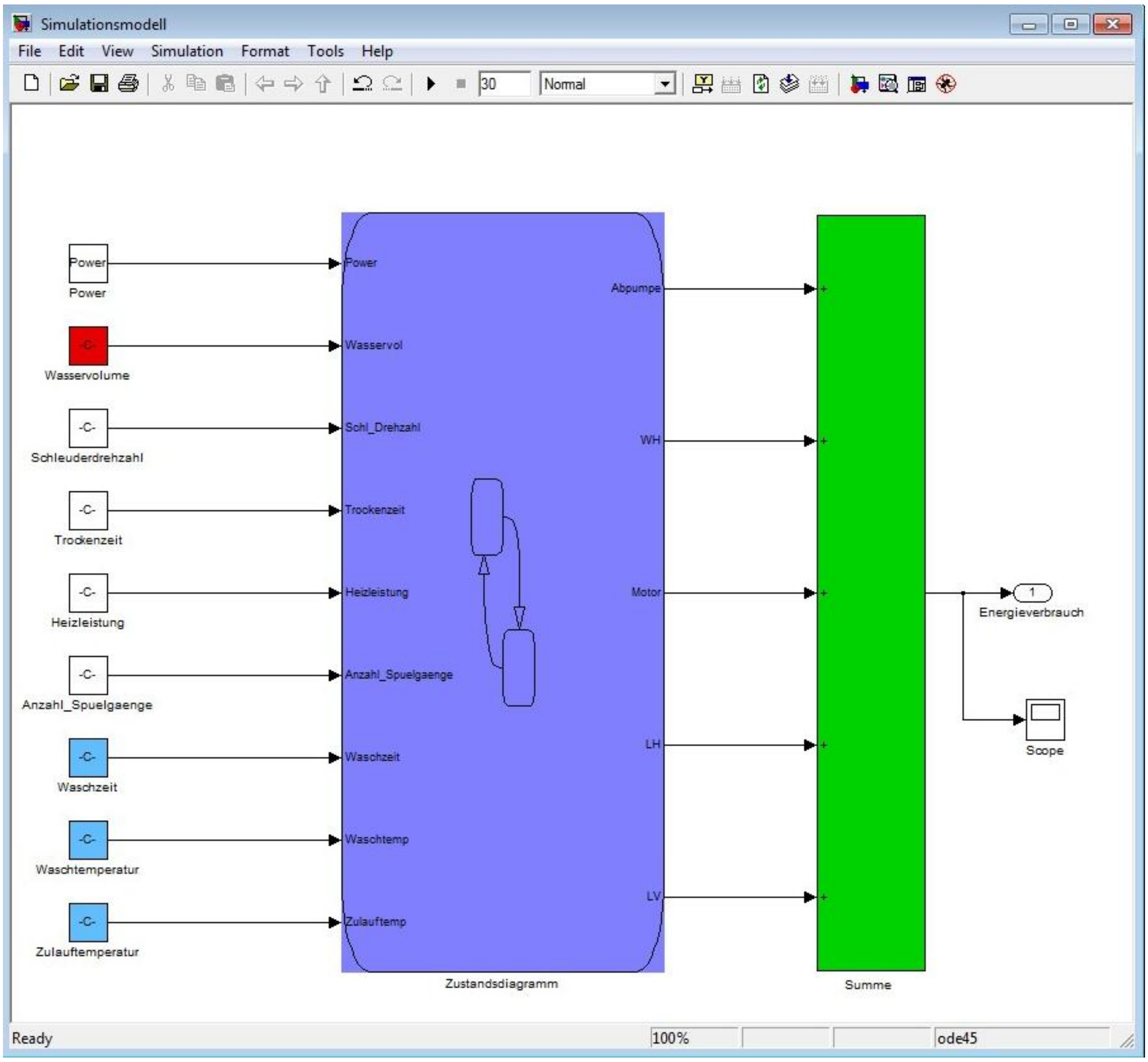


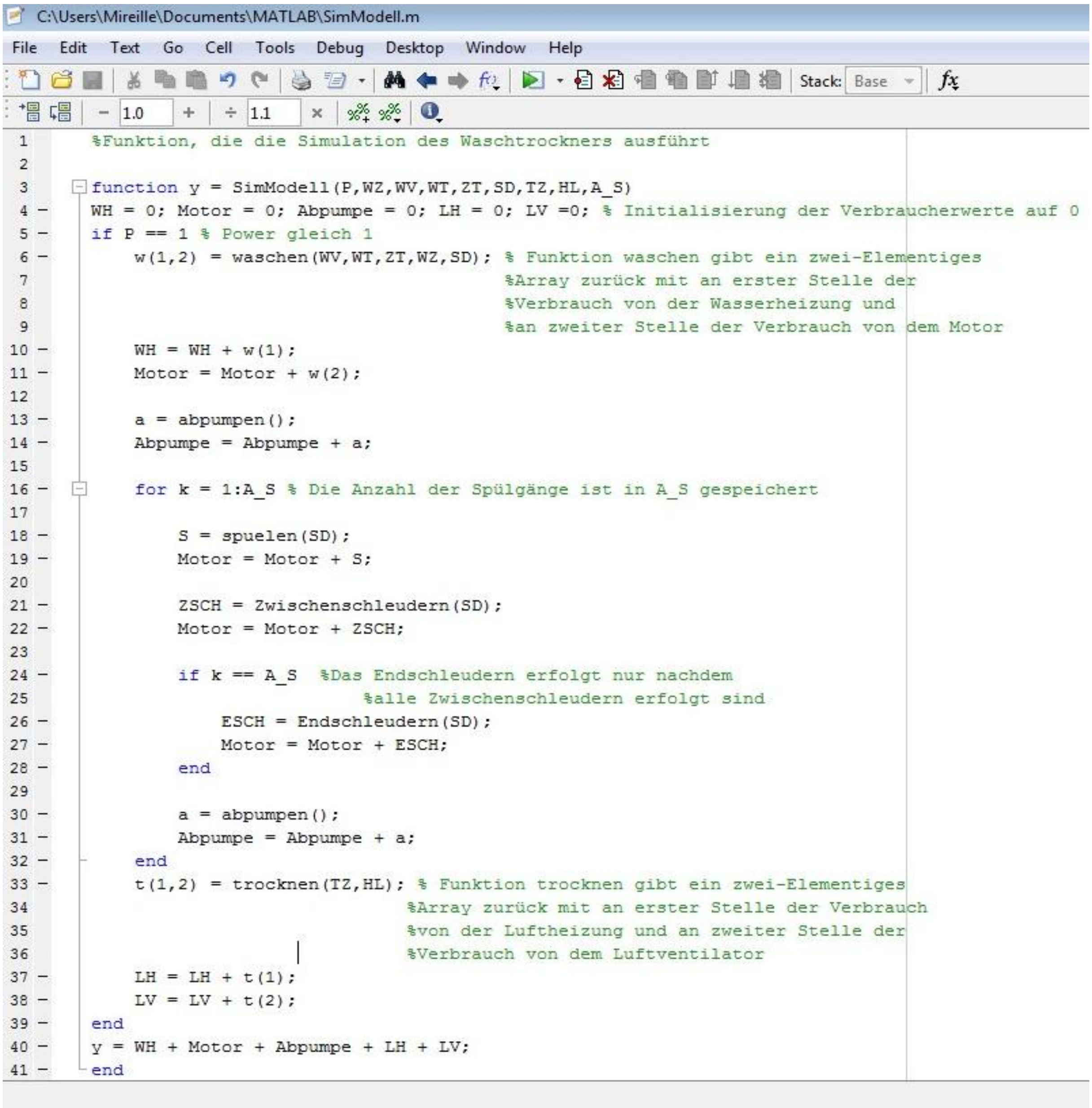
Abbildung 4.4: Blockschaltbild des Simulationsmodells

Auf der linken Seite des Bildes sind die Eingänge dargestellt. Sie werden als Constant-Blöcke repräsentiert.

In der Mitte ist das Zustandsdiagramm zu sehen, dessen innere Struktur und Beschreibung im Abschnitt 3.3 ausführlich erklärt werden.

Auf der rechten Seite des Bilds ist der Ausgang dargestellt.

Das Simulationsmodell wurde auch als Funktion „SimModell.m“ in MATLAB geschrieben, wo die einzelnen Zustände wiederrum als kleine Funktionen geschrieben wurden. In der unteren Abbildung sieht man den Programm-Code dieser Funktion.




```
%Funktion, die die Simulation des Waschtrockners ausführt

function y = SimModell(P,WZ,WV,WT,ZT,SD,TZ,HL,A_S)
WH = 0; Motor = 0; Abpumpe = 0; LH = 0; LV =0; % Initialisierung der Verbraucherwerte auf 0
if P == 1 % Power gleich 1
    w(1,2) = waschen(WV,WT,ZT,WZ,SD); % Funktion waschen gibt ein zwei-Elementiges
                                      %Array zurück mit an erster Stelle der
                                      %Verbrauch von der Wasserheizung und
                                      %an zweiter Stelle der Verbrauch von dem Motor
    WH = WH + w(1);
    Motor = Motor + w(2);

    a = abpumpen();
    Abpumpe = Abpumpe + a;

    for k = 1:A_S % Die Anzahl der Spülgänge ist in A_S gespeichert

        S = spuelen(SD);
        Motor = Motor + S;

        ZSCH = Zwischenschleudern(SD);
        Motor = Motor + ZSCH;

        if k == A_S  %Das Endschleudern erfolgt nur nachdem
                     %alle Zwischenschleudern erfolgt sind
            ESCH = Endschleudern(SD);
            Motor = Motor + ESCH;
        end

        a = abpumpen();
        Abpumpe = Abpumpe + a;
    end
    t(1,2) = trocknen(TZ,HL); % Funktion trocknen gibt ein zwei-Elementiges
                              %Array zurück mit an erster Stelle der Verbrauch
                              %von der Luftheizung und an zweiter Stelle der
                              %Verbrauch von dem Luftventilator
    LH = LH + t(1);
    LV = LV + t(2);
end
y = WH + Motor + Abpumpe + LH + LV;
end
```

Abbildung 4.5: Programm-Code der Funktion „SimModell.m“

4.3.1 Input

Zu den Eingängen des Simulationsmodells zählen der Schalter des Waschtrockners und die Betriebsparameter. Das System hat die Möglichkeit, Simulationen mit verschiedenen Parametern durchzuführen und das Ergebnis zu analysieren. Folgende Parameter variieren dabei:

- Waschzeit
- Waschtemperatur
- Zulauftemperatur

Bevor das System eine Simulation durchführt, muss das System den Parameterwert verändern.

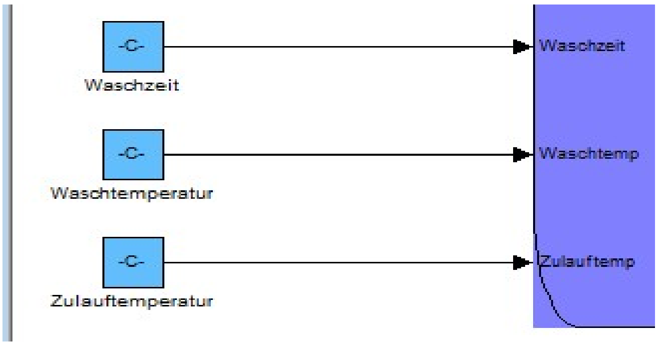


Abbildung 4.6: Zu variierende Parameterblöcke

4.3.2 Output

Im System zur elektrischen Energieanalyse ist es erforderlich, das Ergebnis der Simulation als Zahlenwert zu bekommen, da es immer wieder zum Vergleich herangezogen werden muss. Deswegen werden die Energieverbräuche aller Komponenten aufsummiert und der Gesamtenergieverbrauch als Ausgangsgröße ausgegeben.

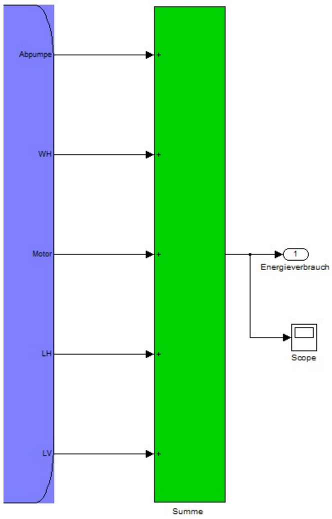


Abbildung 4.7: Gesamtenergieverbrauch des Waschtrockners

4.3.3 Beschreibung der Zuständen

Das Zustandsdiagramm des Waschtrockners lässt sich in Stateflow wie folgt darstellen. Der Waschtrockner arbeitet in verschiedenen Zuständen. Die Übergänge zwischen den Zuständen können durch Bedingungen ausgelöst werden.

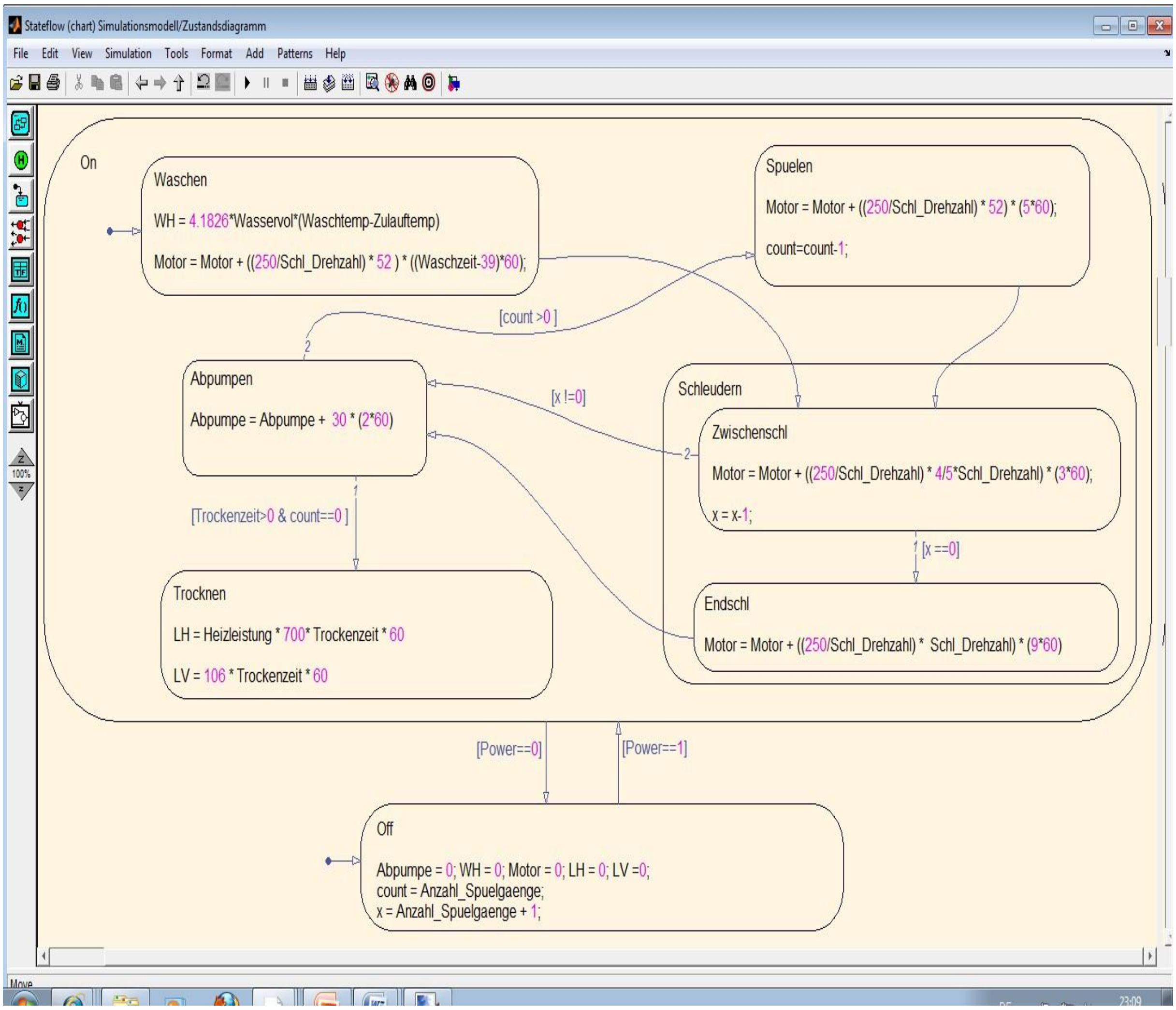
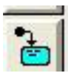


Abbildung 4.8: Zustandsdiagramm in Stateflow Chart

4.3.3.1 Zustände

Die zwei Hauptzustände sind „Off“ und „On“. Der „On “-Zustand besteht aus fünf Subzuständen. Diese können aktiv nur dann sein wenn der Waschtrockner im Zustand „On“ ist. Die Zustände sind „Waschen“, „Spülen“, „Schleudern“, „Abpumpen“ sowie „Trocknen“.

Der Zustand, der aktiv ist sobald die Simulation anfängt ist der Zustand mit dem Default-Transition. Dieser wird mit  festgelegt. Das gilt sowohl für die Hauptzustände als auch für die Subzustände.

- Zustand Waschen

In diesem Zustand wird das Wasser erstmals aufgeheizt bis zur gewünschten Waschtemperatur und somit wird der Energieverbrauch der Wasserheizung ermittelt.
Der Energieverbrauch des Motors während des Waschgangs wird berechnet.

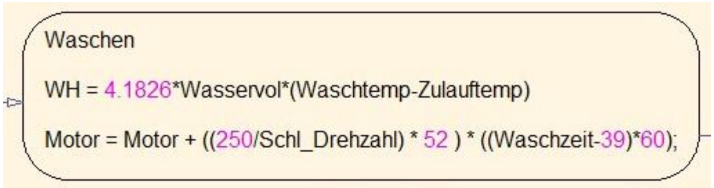


Abbildung 4.9: Zustand „Waschen“ in Stateflow Chart

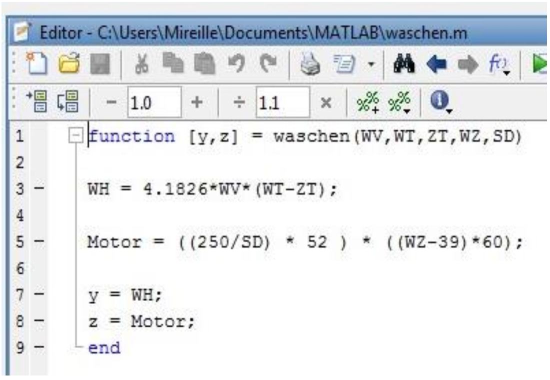


Abbildung 4.10: Programm-Code der Funktion „Waschen.m“

- Zustand Spülen

Der Energieverbrauch des Motors während des Spülgangs wird berechnet.

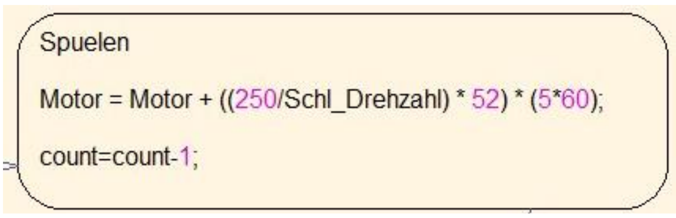


Abbildung 4.11: Zustand „Spuelen“ in Stateflow Chart

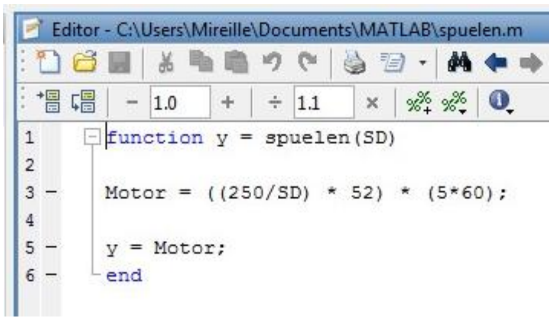


Abbildung 4.12: Programm-Code der Funktion „Spuelen.m“

- Zustand Schleudern

Der Energieverbrauch des Motors während des Schleudergangs wird berechnet.

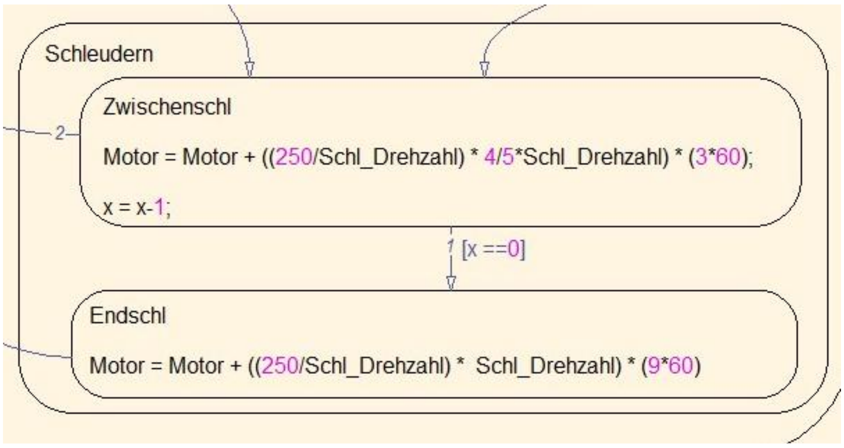


Abbildung 4.13: Zustände „Zwischenchleudern" und „Endschleudern" in Stateflow Chart

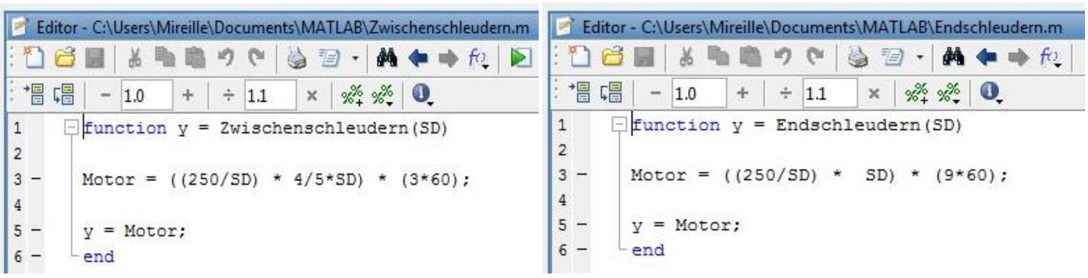


Abbildung 4.14: Programm-Code der Funktionen „Zwischenchleudern.m" und „Endschleudern.m"

- Zustand Abpumpen

Der Energieverbrauch der Ablaufpumpe wird berechnet.

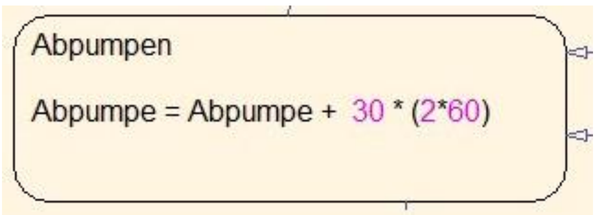


Abbildung 4.15: Zustand „Abpumpen" in Stateflow Chart

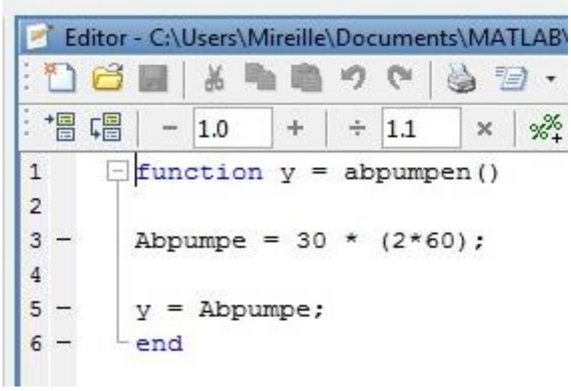


Abbildung 4.16: Programm-Code der Funktion „Abpumpen.m“

- Zustand Trocknen

Hier wird der Energieverbrauch aller zwei in diesem Zustand aktiven Verbraucher berechnet.

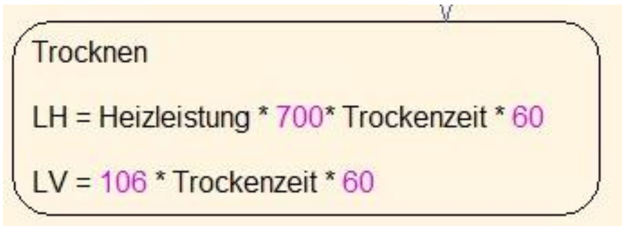


Abbildung 4.17: Zustand „Trocknen“ in Stateflow Chart

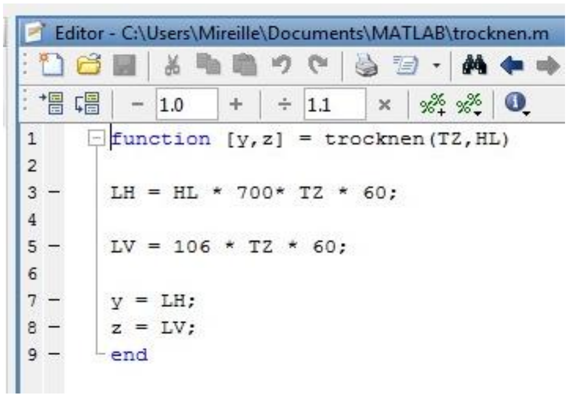


Abbildung 4.18: Programm-Code der Funktion „Trocknen.m“

4.3.3.2 Transition

Transition beschreiben die Übergänge von einem Zustand zu einem anderen. In Stateflow ist es möglich, Parameter, Bedingungen, Funktionen als Ereignisse zu interpretieren. Für das Zustandsdiagramm des Waschtrockners werden die Transitionen Beispielsweise durch Eingangssignale ausgelöst. (z.B. für „Power == 1“, wird vom Zustand „Off “ zum Zustand „On“ gewechselt und umgekehrt für „Power == 0“, wird vom Zustand „On“ zum Zustand „Off“ gewechselt.)

4.3.3.3 Steuerung

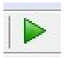
Die Steuerung wird durch Funktionen und Parameter in einem Zustand realisiert. Wenn ein Zustand aktiv ist, werden Funktionen ausgeführt oder Parameter gesetzt, welche in diesem Zustand vordefiniert sind, z.B. sind beim Zustand „Off" alle Verbrauer-Werte auf „0" gesetzt.

4.4 Algorithmus zur Generierung von Optimierungsvorschlägen

Der Algorithmus zur Generierung von Optimierungsvorschlägen ist als Script „OptAlgo.m" in MATLAB geschrieben. Für die Optimierung muss das System für die elektrische Energieanalyse die verfügbare Informationen und Kenntnisse betrachten. Die Optimierung besteht darin, die Simulation mit allen möglichen Kombinationen der zu variierenden Parameter zu starten und die Ergebnisse mit dem aus der Simulation des Ist-Zustands zu vergleichen. Ist nach Ende einer Simulation mit einer Kombination der gesamte Energieverbrauch kleiner als bei der Simulation des Ist-Zustands, werden diese Parameterwerte als Optimierungsparameter ausgegeben.

4.5 Installation und Ausführung

Der Prototyp wurde in einer aktuellen Version von MATLAB (Version 7.11.0.584 (R2010b)) realisiert. Es ist also gut möglich, dass bei früheren Versionen kleine Anpassungen notwendig sind.

Da alle Einstellungen über eine Benutzungsoberfläche gemacht werden, muss diese geöffnet werden. Die Benutzungsoberfläche muss erstmal in GUIDE geöffnet werden, dazu klickt man auf den Namen der Datei mit der rechten Maus-Taste und wählt „Open in GUIDE". Dann drückt man auf die grüne Schaltfläche  um die Benutzungsoberfläche auszuführen. Erst jetzt können alle Einstellungen gemacht werden wie Betriebsparameter und Nebenbedingungen eingeben und auf den Start-Button drücken.

Im Folgenden soll getestet werden, welche Auswirkung das Gewicht der Wäsche auf die Generierung der Optimierungsvorschläge hat. Da das Gewicht der Wäsche, wenn es als Nebenbedingung angegeben ist Einfluss auf die zu erwärmende Wassermenge und somit auch auf den Energieverbrauch hat, sollte es mehr Möglichkeiten geben für die Optimierung bei einer kleineren Wäschemenge.

<u>Zu evaluierende Testfälle mit Ergebnisse:</u>

Der Unterschied zwischen beiden Testfälle besteht nur darin, dass beim zweiten Testfall das Gewicht der Wäsche gleich fünf Kilogramme gewählt wurde, statt zwei Kilogramme wie beim ersten Testfall.

1) Erster Testfall:

Betriebsparameter:

Waschprogramm (Pflegeleicht)
Schleuderdrehzahl (650 U/min)
Waschtemperatur (60 Grad)
Temperatur des Leitungswasser (10 Grad)
Trockenzeit (30 min)
Heizleistung (halb)

Nebenbedingungen:

Verschmutzungsgrad (mittel)
Gewicht der Wäsche (2 kg)
Maximale Waschzeit (80 min)

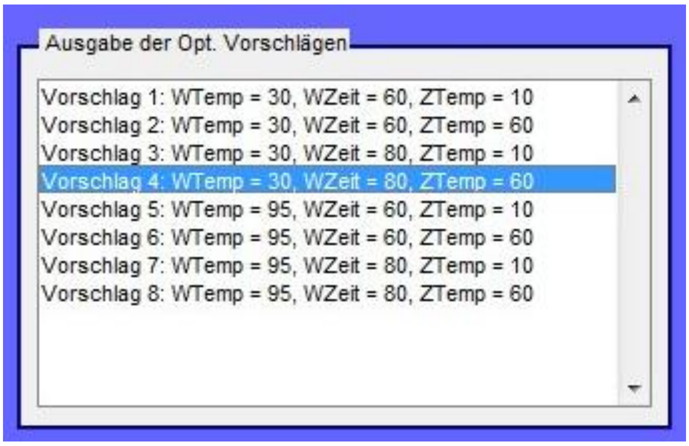


Abbildung 4.19: Generierte Optimierungsvorschläge (Gewicht der Wäsche 2 kg)

2) Zweiter Testfall:

Betriebsparameter:

Waschprogramm (Pflegeleicht)
Schleuderdrehzahl (650 U/min)
Waschtemperatur (60 Grad)
Temperatur des Leitungswasser (10 Grad)
Trockenzeit (30 min)
Heizleistung (halb)

Nebenbedingungen:

Verschmutzungsgrad (mittel)
Gewicht der Wäsche (5 kg)
Maximale Waschzeit (80 min)

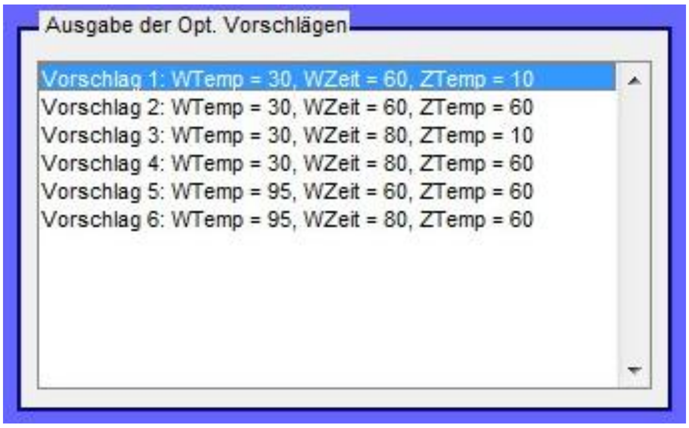


Abbildung 4.20: Generierte Optimierungsvorschläge (Gewicht der Wäsche 5 kg)

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein System für die elektrische Energieanalyse eines Waschtrockners entwickelt. Dazu wurde zuerst der Waschtrockner analysiert und gemessen und auf dieser Basis ein Simulationsmodell zur Simulation des Energieverbrauchs anhand von Stateflow in Matlab/Simulink realisiert. In der Konzeption ist das Verhalten des Waschtrockners in verschiedenen Zuständen dargestellt. Das System enthält einen Algorithmus, mit dem automatisiert Optimierungsvorschläge zur Reduktion des Energieverbrauchs des beobachteten Systems generiert werden können. Nach der Erstellung des Prototyps wurden Testszenarien ausgeführt um die Richtigkeit des Systems zu prüfen.

Somit hat der Nutzer die Möglichkeit automatisierte Systeme, in Bezug auf den Energieverbrauch, zu optimieren, ohne selbst systemspezifisches Wissen besitzen zu müssen.

5.1 Erfahrungen

Im Laufe dieser Diplomarbeit habe ich einen deutlichen Überblick über das IAS Vorgehensmodell bekommen. Davon habe ich gelernt, wie man ein Projekt planen und organisieren kann.

Zum Beginn der Arbeit habe ich Dokumente aus Büchern und aus Internet gesucht, die über den Waschtrockner und über den Energieverbrauch von automatisierten Systemen berichten. Dadurch bekam ich Kenntnisse über die Komponenten, die Arbeitsweise sowie der Energieverbrauch des Waschtrockners. Außerdem lernte ich den modellbasierten Anstz zur elektrischen Energieanalyse kennen.

Während der Arbeit habe ich die Möglichkeit gehabt, mit dem Entwicklungstool Matlab und seine Erweiterungen Simulink und Stateflow umzugehen. Da diese in der Industrie immer noch sehr gefragt sind, sind sie gute Vorkenntnisse für mein späteres Berufsleben.

5.2 Probleme

Am Anfang jeder Phase bin ich vielen Problemen begegnet. Meistens habe ich nicht gut verstanden wie die Vorgehensweise bei der Phase ist, da diese Arbeit der erster Projekt, den ich nach dem „Modell zur konzeptioneller Arbeit“ gemacht habe. Um diese Probleme zu lösen musste ich aus Büchern und im Internet recherchieren und mit meinem Betreuer diskutieren, was aber am Ende dazu beigetragen hat, dass ich noch mehr unabhängiger bei der Lösung von Problemen wurde.

In der Prototyping-Phase traten auch Probleme bei der Erstellung des Simulationsmodells auf, welche am Ende doch noch gelöst werden konnten.

Danksagung

Diese Arbeit entstand mit der Unterstützung mehrerer Personen, und ohne ihre Hilfe wäre die Vollendung sicher schwer möglich gewesen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. P. Göhner möchte ich für die Bereitstellung dieser Diplomarbeit danken.

Meinem Betreuer Dipl.-Ing. Andreas Beck bin ich für seine fachliche Unterstützung und die aufgebrachte Zeit für Fragen und Probleme meinerseits genauso zu Dank verpflichtet wie meinen Komillitonen der IAS, die stets hilfsbereit und ansprechbar waren zusammen mit all den anderen, die mich in der einen oder anderen Weise bei meiner Arbeit unterstützt haben.

Literaturverzeichnis

[BäBe10] **Bäurle, A.; Beck, A.:** *Ausarbeitung WSA Nr. 2342, Konzeption eines Praktikumversuchs zur Einführung in die Simulation des Energieverbrauchs technischer Systeme,* Stuttgart: IAS. 2010

[Beck11] **Beck, A:** *Modellbasierte nutzerorientierte elektrische Energieanalyse automatisierter Systeme – Grundlagen, Zielsetzung und Anforderungen; Zwischenbericht,* Stuttgart: IAS 2011

[BeGö10] **Beck, A; Göhner, P.:** *Generation of Optimization Proposals for electrical Energy Analysis of Industrial Automation Systems. IEEE International Energy Conference and Exhibition (EnergyCon) 2010, Manama,* Bahrain, 2010

[BeJa10] **Beck, A; Jazdi, N.:** *Model-based Electrical Energy Analysis of Industrial Automation Systems. IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR) 2010, Cluj-Napoca*, Romania, 2010

[DiBe09] **Ditterich, D.; Beck, A.:** *Ausarbeitung DA Nr. 2279, Untersuchung von Methoden und Werkzeugen zur Simulation des Energieverbrauchs von Prozessautomatisierungssystemen,* Stuttgart: IAS, 2009

[Dude07] **Duden – Das Fremdwörterbuch**, 9. Aufl. Mannheim, 2007

[Göhn09b] **Göhner, P.:** *Skript zur Vorlesung Informatik II – Grundlagen der Softwaretechnik*, Universität Stuttgart, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik, 2009

[Hame09] **Hameg Instruments GmbH:** *Benutzerhandbuch des 8kW Power-Meters HM8115-2,* Mainhausen 2009

[IAS10a] Homepage der Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik, Universität Stuttgart, www.ias.uni-stuttgart.de/forschung/demonstrationsanlagen/?id=13

[IAS10b] Homepage der Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik, Universität Stuttgart, http://www.ias.uni-stuttgart.de/forschung/forschungsthemen/be_thema.html

[Kühn05] **Kühn, P.J.:** *Skript zur Vorlesung Einführung in die Informatik I, II; Teil A: Grundlagen und Technische Informatik.* Universität Stuttgart, Institut für Kommunikationsnetze und Rechnersysteme, 2005

[LaGö99] **Lauber, R.; Göhner, P.:** *Prozessautomatisierung I,* 3. vollst. überarb. Aufl. -1999, Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 1999

[LiMa06] **Li, D.; Maurmaier, M.:** *Ausarbeitung DA Nr. 2079, Analyse der Entwicklung eines technischen Systems mit führender funktionaler Sicht am Beispiel eines Waschtrockners*, Stuttgart: IAS, 2006

[MaBe09] **Malz, C.; Beck, A.:** *Studienarbeit SA 2267, Untersuchung von Strategien zur Energieeinsparung in Prozessautomatisierungssystemen*, Stuttgart: IAS, 2009

[Math11] Homepage der Firma Mathworks, http://www.mathworks.de/products/stateflow/description1.html

[PfBe10] **Pfister, M.; Beck, A**.: *Studienarbeit SA 2302, Konzeption einer Energiesimulation für den Modellprozess „IAS-Aufzug" in Modelica*, Stuttgart: IAS, 2010

[PfBe11] **Pfister, M.; Beck, A.:** *Ausarbeitung DA Nr. 2357, Entwicklung eines Konzepts zur modellbasierten Generierung von Energieoptimierungsvorschlägen,* Stuttgart: IAS, 2011

[Priv] Gebrauchsanweisung Waschtrockner Privileg Duo 6610

[ScTr03] **Schweizer, M.; Traumüller, J.:** *Diplomarbeit DA 1933, Entwurf und Implementierung einer Mikrocontroller-basierten Steuerung mit flexibler Diagnoseintegration für einen Wasch-Trockner*, Stuttgart: IAS, 2003

[WaBe10] **Wang, F.; Beck, A.:** *Ausarbeitung SA Nr. 2306, Konzeption einer Energiesimulation für den Modellprozess "Industrieller Kaffeeautomat" in Matlab/Simulink*, Stuttgart: IAS, 2010

[Wiki10a] **Wikipedia:** Elektrische Energie, http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische_Energie

[Wiki10b] **Wikipedia:** Nebenbedingungen, http://de.wikipedia.org/wiki/Nebenbedingung

[Wiki11] **Wikipedia:** Bottich, http://de.wikipedia.org/wiki/Bottich

Erklärung

Ich erkläre, die Arbeit selbständig verfasst und bei der Erstellung dieser Arbeit die einschlägigen Bestimmungen, insbesondere zum Urheberrechtsschutz fremder Beiträge, eingehalten zu haben. Soweit meine Arbeit fremde Beiträge (z. B. Bilder, Zeichnungen, Textpassagen) enthält, erkläre ich, dass diese Beiträge als solche gekennzeichnet sind (z. B. Zitat, Quellenangabe) und ich eventuell erforderlich gewordene Zustimmungen der Urheber zur Nutzung dieser Beiträge in meiner Arbeit eingeholt habe.

Unterschrift:

Stuttgart, den 15.04.2011